



Università di Pisa
**Dipartimento di Ingegneria per l'Energia, i Sistemi, il Territorio
e le Costruzioni**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Idraulica, dei Trasporti
e del Territorio**

I appello Esame di Laurea anno 2013

***Digestione anaerobica della FORSU: analisi
comparativa e tecnologica tra la digestione ad
umido e a secco***

Relatore

Prof. Ing. RENATO IANNELLI

Firma:

Candidato

Dott. MARIA BEATRICE OSTUNI

Firma:

Anno Accademico 2011/2012

**A chi ha saputo credere in me;
per chi ancora crede e crederà in me.**

**Ai miei tre angeli custodi,
silenziosi esempi e appassionati cacciatori.**

Estratto

Con l'entrata in vigore del protocollo di Kyoto sono divenuti necessari la ricerca e l'impiego di fonti energetiche rinnovabili che riducano la dipendenza dai combustibili fossili, diminuendo così le emissioni di gas serra in atmosfera. Le biomasse rappresentano una possibilità concreta e attuale in tal senso.

In questo studio è stato considerato l'impianto di digestione anaerobica ad umido della frazione organica di rifiuti solidi urbani (FORSU) da realizzare a Molfetta (Ba). In particolare il confronto tra il progetto di digestione anaerobica con tecnologia ad umido e l'analogo a secco, con successiva valorizzazione del biogas prodotto attraverso la cogenerazione.

In primo luogo viene presentato uno studio sulla digestione anaerobica, esaminando gli aspetti concernenti i diversi sistemi di trattamento dei vari tipi di biomasse. Inoltre viene riportata la situazione energetica relativa alle fonti rinnovabili, lo scenario mondiale, europeo e italiano. Si è proceduto poi alla presentazione della tecnologia scelta con le principali caratteristiche innovative, ed infine è stato effettuato il confronto, tramite progettazione di massima con tecnologia a secco, delle due possibili metodologie di digestione.

Si evidenzia come ormai anche gli impianti di digestione anaerobica a secco siano tecnologicamente competitivi e potrebbero rappresentare in futuro una vantaggiosa risorsa per l'estrazione del biogas da FORSU.

Parole chiave: *digestione anaerobica, biogas, FORSU, biomasse, cogenerazione, compost.*

Abstract

After the Kyoto protocol was introduced, research and utilization of renewable energy sources have become necessary to reduce the dependency on fossil fuels and decrease the greenhouse gas emissions. For this reason the biomass represents a realistic and actual opportunity.

In this study the case of an anaerobic wet digestion plant of the organic fraction separately collected from municipal solid waste (OFMSW) situated in Molfetta (Ba) has been taken into consideration; in particular the comparison between the project of wet anaerobic digestion and the analogous dry anaerobic digestion, with the subsequent promotion of biogas production through co-generation has been taken into account.

Firstly a study of anaerobic digestion, with particular interest for the different systems for processing of the various types of biomasses has been presented. Moreover the presentation of the energetic situation of renewable sources, in the World, Europe and Italy has been reported. Then follows the presentation of the selected technology, with principal innovative characteristics, and in the end a comparison between the two digestion methodologies, through a preliminary plan and adopting a dry treatment system has been carried out.

By this time is evident that also dry anaerobic digestion plants are technologically competitive and could represent in the future a profitable resource for biogas extraction from the OFMSW (Organic Fraction Municipal Solid Waste).

Key words: *anaerobic digestion, biogas, OFMSW, biomasses, cogeneration, compost.*

Indice

INTRODUZIONE	11
 1. La digestione anaerobica ad umido e a secco: analisi e specificità	15
1.1 Premessa	15
1.2 Generalità sul processo di digestione anaerobica	15
1.3 Fasi del processo di digestione anaerobica	16
1.3.1 Parametri di stabilità del processo	18
1.3.2 Tossicità dell'ambiente di crescita	19
1.3.3 Substrati avviabili alla digestione anaerobica	21
1.4 Stato dell'applicazione industriale della digestione anaerobica dei rifiuti solidi urbani in Italia e in Europa	25
1.4.1 La digestione anaerobica dei rifiuti: lo stato dell'arte in Europa	25
1.4.2 La situazione in Italia	26
1.5 Processi di digestione a fase unica	28
1.5.1 Digestione wet	28
1.5.2 Digestione semi-dry	31
1.5.3 Digestione dry.....	33
1.5.4 Processi Batch	37
 2. L'integrazione tra la digestione anaerobica e il compostaggio	40
2.1 La frazione organica dei rifiuti solidi urbani	40
2.2 Il biogas: una fonte energetica rinnovabile	42
2.2.1 Produzione di biogas	44

2.2.2	Depurazione del biogas	45
2.2.3	Utilizzo del biogas	47
2.3	La disidratazione dei fanghi	49
2.4	Stoccaggio finale dei prodotti e bilancio di massa dell'impianto	51
2.5	Il compostaggio	53
2.6	I sistemi integrati anaerobico-aerobico	56
2.6.1	I costi	58
2.7	La progettazione degli impianti di digestione anaerobica dei rifiuti	60
3.	Descrizione impianto di digestione anaerobica ad umido	61
3.1	Tecnologie e producibilità energetica	61
3.1.1	Descrizione generale del progetto	61
3.1.2	Aspetti progettuali	63
3.1.3	Operazioni di pretrattamento	64
3.1.4	Dimensionamento della fase di digestione anaerobica	66
3.1.5	Dimensionamento della fase di recupero energetico del biogas	74
3.1.6	Dimensionamento della fase di compostaggio	79
3.2	Impatti sull'ambiente e sicurezza	81
3.2.1	Quadro di riferimento della sicurezza	81
3.2.2	Quadro di riferimento ambientale	84
3.3	Gestione e manutenzione	89
3.4	Piano economico finanziario, computo metrico estimativo e business plan	99
3.4.1	Analisi dei costi di gestione impianto di digestione anaerobica ad umido ...	99
3.4.2	Computo metrico estimativo impianto di digestione anaerobica ad umido	104
3.4.3	Business plan impianto di digestione anaerobica ad umido	107

4. Scelta della tecnologia a secco ed applicazioni reali	109
4.1 Descrizione generale del progetto a secco.....	109
4.2 Produzione di biogas tramite la fermentazione a secco	110
4.3 Il processo di digestione a secco Bekon	110
4.3.1 Economicità ed efficienza del processo Bekon	111
4.3.2 Caratteristiche principali della tecnologia Bekon	111
4.3.3 Processo “Waste to Energy”	112
4.3.4 Fornitura del materiale e operazioni di scarico e carico dei box di digestione	113
4.3.5 Sicurezza di lavoro.....	113
4.3.6 Processo di digestione e gestione dei box di digestione	114
4.3.7 Tecnologia, qualità e sicurezza degli impianti	117
4.3.8 Utilizzo del biogas e bilancio energetico	118
4.3.9 Tecnologia di gestione dei processi	119
4.3.10 Informazioni supplementari	120
4.3.11 Sicurezza	121
4.3.12 Standard di sicurezza ed emissione	122
4.4 Applicazioni reali della tecnologia scelta	123
4.4.1 Impianti di riferimento in Germania	123
4.4.2 Impianti di riferimento in Italia	128
4.4.3 Impianti di riferimento in Francia	129
4.4.4 Impianti di riferimento in Svizzera	130
5. Progettazione impianto di digestione anaerobica a secco ...	132
5.1 Tecnologie e producibilità energetica	133
5.1.1 Aspetti progettuali	133
5.1.2 Operazioni di pretrattamento	135

5.1.3	Dimensionamento della fase di digestione anaerobica	136
5.1.4	Dimensionamento della fase di recupero energetico del biogas	140
5.1.5	Dimensionamento della fase di compostaggio	141
5.2	Impatti sull'ambiente e sicurezza	144
5.2.1	Quadro di riferimento della sicurezza	144
5.2.2	Quadro di riferimento ambientale	146
5.3	Gestione e manutenzione	150
5.4	Piano economico finanziario, computo metrico estimativo e business plan	157
5.4.1	Analisi dei costi di gestione impianto di digestione anaerobica a secco	157
5.4.2	Computo metrico estimativo impianto di digestione anaerobica a secco ..	162
5.4.3	Business plan impianto di digestione anaerobica a secco	165
6.	Conclusioni	167
	BIBLIOGRAFIA	171

ALLEGATI:

- All. 1: Schema funzionale impianto di digestione anaerobica a secco
- All. 2: Planimetria generale impianto di digestione anaerobica a secco
- All. 3: Schema funzionale impianto di digestione anaerobica ad umido
- All. 4: Planimetria generale impianto di digestione anaerobica ad umido

INTRODUZIONE

Energia e fonti rinnovabili

Le energie rinnovabili (o anche fonti di energia rinnovabile) sono quelle fonti di energia non “esauribili” nella scala dei tempi “umani” o che riescono a rinnovare rapidamente la loro disponibilità dopo essere state sfruttate. Sono queste le fonti di energia che possono permettere uno sviluppo sostenibile dell’umanità, senza che si danneggi la natura e per un tempo indeterminato.

Rientrano in questo campo:

- Energia solare (termica e fotovoltaica)
- Energia eolica
- Energia idroelettrica
- Energia del moto ondoso
- Energia maremotrice
- Biomasse
- Biogas
- Olio (carburante)
- Biodiesel
- Energia geotermica

Inoltre non essendoci una definizione univoca dell'insieme delle fonti rinnovabili, esistendo in vari ambiti diverse opinioni sull'inclusione o meno di una o più fonti nel gruppo delle "rinnovabili", secondo la normativa di riferimento italiana (Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387) sono considerate "rinnovabili": *le fonti energetiche non fossili (eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice, idraulica, biomasse, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas). In particolare, per biomasse si intende: la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.*

Le fonti energetiche rinnovabili rappresentano concretamente l’unica soluzione per evitare di dipendere dai paesi che possiedono le scorte di combustibili fossili e per evitare l’incremento delle emissioni in atmosfera. Nelle proiezioni dell’International Energy Agency (IEA) (IEA (2010)) le fonti rinnovabili possono arrivare a soddisfare il 20% della domanda d’elettricità mondiale al 2020, e il 50% di energia primaria nel 2050. Affinché ciò accada è necessario garantire i fondi per la ricerca, l’innovazione tecnologica e la sua applicazione commerciale (Santi, Cecchini (2009)).

Nell'ambito della produzione di energia elettrica le fonti rinnovabili vengono infine classificate in "fonti programmabili" e "fonti non programmabili", a seconda che possano essere programmate in base alla richiesta di energia. Nel secondo gruppo (non programmabili) si trovano gli impianti adibiti alla produzione di biogas.

Biomasse e tecnologie d'impiego

Le biomasse includono un insieme di materiali d'origine vegetale, scarti da agricoltura, allevamento o industria del legno riutilizzati in apposite centrali termiche per produrre energia elettrica (Santi, Cecchini (2009)).

Tra le principali materie prime energetiche da biomasse troviamo:

1. Legname da ardere
2. Residui agricoli e forestali
3. Scarti dell'industria agroalimentare
4. Reflui degli allevamenti
5. Rifiuti urbani
6. Specie vegetali dedicate per lo scopo.

La brevità del periodo di ripristino fa sì che le biomasse rientrino tra le fonti energetiche rinnovabili, in quanto il tempo di sfruttamento della sostanza è paragonabile a quello di rigenerazione.

Poiché nel concetto di rinnovabilità di una fonte energetica è insita anche la sostenibilità ambientale, sarà necessario che le biomasse provengano da pratiche aventi impatto ambientale trascurabile o nullo (Santi, Cecchini (2009)).

Quando si bruciano le biomasse, estraendone l'energia immagazzinata nei componenti chimici, l'ossigeno presente nell'atmosfera si combina con il carbonio delle piante e produce, tra l'altro, anidride carbonica, uno dei principali gas responsabili dell'effetto serra. Tuttavia, la stessa quantità di anidride carbonica viene assorbita dall'atmosfera durante la crescita delle biomasse. Il processo è ciclico. Fino a quando le biomasse bruciate sono rimpiazzate con nuove biomasse, l'immissione netta di anidride carbonica nell'atmosfera è nulla.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Sono quindi biomasse, oltre alle essenze coltivate espressamente per scopi energetici, tutti i prodotti delle coltivazioni agricole e della forestazione, compresi i residui delle lavorazioni agricole, gli scarti dei prodotti agro-alimentari destinati all'alimentazione umana o alla zootecnia, i residui, non trattati chimicamente, dell'industria della lavorazione del legno e della carta, tutti i prodotti organici derivanti dall'attività biologica degli animali e dell'uomo, come quelli contenuti nei rifiuti urbani (la "frazione organica" dei rifiuti).

L'utilizzo delle biomasse presenta una grande variabilità in funzione dei tipi dei materiali disponibili e, nel tempo, sono state sviluppate molte tecnologie di conversione energetica, delle quali alcune possono considerarsi giunte ad un livello di sviluppo tale da consentirne l'utilizzazione su scala industriale, altre, invece, più recenti e molto complesse, necessitano di ulteriore sperimentazione al fine di aumentare i rendimenti e ridurre i costi di conversione energetica (Santi, Cecchini (2009)).

Stato dell'arte e prospettive di sviluppo

Il dibattito riguardante l'energia è un tema mondiale, il cui centro è il passaggio dall'era del petrolio a fonti d'energia a minore impatto ambientale ed incertezza d'approvvigionamento. Lo scenario planetario, da diversi punti di vista, compresi quelli di grandi compagnie petrolifere, indica come prossimo l'inizio di una fase di "picco" per la disponibilità di riserve mondiali di petrolio e gas, che segnala un periodo d'offerta più scarsa e d'incertezze politiche ed economiche (Santi, Cecchini (2009)).

Il crescente peggioramento della qualità dell'ambiente, legato all'utilizzo dei combustibili fossili, e la necessità di garantire una maggiore sicurezza all'approvvigionamento energetico implicano che, nell'ottica di uno sviluppo equilibrato e sostenibile, un ruolo di primaria importanza sia attribuito allo sfruttamento di fonti di energia pulita, sicura e rinnovabile.

Secondo lo "scenario di riferimento" dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) (IEA (2010)), il consumo mondiale di energia primaria aumenta di circa l'1,7% all'anno nelle prossime tre decadi tra il 2000 e il 2030 a causa della crescita economica e demografica. Sempre secondo questo scenario il sistema energetico mondiale continuerà ad essere dominato dai combustibili fossili (carbone, lignite, petrolio e gas naturale). Nel 2030 si prevede che essi costituiranno quasi il 90% della domanda totale di energia. Il petrolio rimane la fonte principale di energia (34%) seguita dal carbone (28%) e dal gas naturale (25%). Nel 2030 il nucleare rappresenterà il 5% del portafoglio energetico globale, a fronte di un valore del 7% del 2000.

Si prevede che l'energia da fonti rinnovabili soddisfi l'8% del fabbisogno mondiale di energia nel 2030. Questa quota è inferiore a quella del 13% osservata nel 2000 ed è essenzialmente dovuta al continuo declino del consumo di biomassa tradizionale in Asia ed Africa ed all'aumento dell'urbanizzazione, alla deforestazione ed al passaggio a forme di energia moderna nelle aree rurali.

Il 60% dell'incremento della domanda di energia nel mondo fra il 2000 e il 2030 verrà dai paesi in via di sviluppo, specialmente dall'Asia. La Cina contribuirà, per un quinto alla domanda mondiale di energia e per la metà nell'utilizzo del carbone, nelle prossime 3 decadi.

L'Unione Europea importa il 50% del proprio fabbisogno energetico e più del 75% del petrolio grezzo. Le previsioni future indicano una domanda in crescita ad un tasso dell'1,9% annuo, alla quale si potrà far fronte, in assenza di soluzioni alternative, solo a costo di ulteriori rischi ambientali.

L'utilizzo indiscriminato dei combustibili fossili è tra le principali cause del fenomeno delle piogge acide, che stanno provocando la morte di migliaia di ettari di foreste boreali. Inoltre, e non meno gravemente, esso contribuisce in modo sostanziale all'effetto serra, causato dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera.

In uno scenario invariato, la concentrazione di CO₂ atmosferica potrebbe raggiungere i 560 ppm entro l'anno 2050, portando a sconvolgimenti climatici difficilmente prevedibili, ma non certo positivi (IEA (2010)).

L'inquinamento dell'aria dovuto a gas di scarico (CO, SOx, NOx, benzene, ecc.) degli autoveicoli e degli impianti di riscaldamento ha raggiunto livelli insostenibili per la salute pubblica, soprattutto nelle aree metropolitane, nonostante l'impegno dell'industria petrolifera ad immettere sul mercato combustibili a minore impatto ambientale (Santi, Cecchini (2009)).

In questo contesto, la Conferenza di Kyoto del 1997 ha rappresentato un momento di svolta, avendo delineato obiettivi mirati alla riduzione dell'impatto ambientale dei sistemi di conversione dell'energia. Tali obiettivi, sebbene non ancora ratificati dalla maggior parte dei Paesi, hanno portato ad un incremento di iniziative in tutto il mondo.

L'intendimento comune a tutti i Paesi partecipanti è stato quello di ricorrere ad un massiccio uso delle fonti di energia rinnovabile al fine di contenere l'inquinamento da CO₂.

Oggi la politica energetica europea è in grado di esprimere direttive cogenti per tutti (creazione del Mercato Unico dell'Energia), negoziare delle posizioni comuni (impegni assunti a Kyoto e ripartizione tra gli stati).

I principali impegni riguardano il miglioramento dell'efficienza energetica, lo sviluppo e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, la promozione dello sviluppo di combustibili "puliti" e il ricorso a tecnologie per ridurre l'inquinamento.

Negli ultimi anni, come riportato da Santi e Cecchini (2009), le politiche energetiche nei Paesi Membri dell'Unione Europea si sono focalizzate su due temi principali:

- 1) Risolvere i problemi ambientali connessi all'uso di fonti energetiche di origine fossile ed in particolare alla riduzione delle emissioni dei gas serra nei termini stabiliti dal Protocollo di Kyoto. In ambito europeo, la Conferenza dei Ministri per l'ambiente di Lussemburgo ha fissato al 6,5% per l'Italia la quota di riduzione al 2008-12 delle emissioni di gas serra rispetto al 1990;
- 2) Accrescere l'efficienza delle industrie energetiche e rendere più competitivi i mercati dell'elettricità e del gas attraverso la definizione di principi e regole comuni, senza danneggiare l'ambiente e sfruttare eccessivamente le riserve esistenti.

1. La digestione anaerobica ad umido e a secco: analisi e specificità

1.1 Premessa

Il sistema di gestione dei rifiuti si muove ormai da tempo verso la direzione strategica del miglioramento alla fonte della qualità delle matrici riutilizzabili e della riduzione a monte del processo della quantità dei rifiuti prodotti. Tutto questo al fine di contenere l'impatto sulla salute umana e sull'ambiente e di permettere lo sviluppo delle più appropriate tecnologie di trattamento.

Questo approccio comporta inevitabilmente considerazioni sulle fonti di energia utilizzabili ed il loro riflesso sull'ambiente attraverso un'ampia visione che non si limiti al bilancio locale o addirittura dell'impianto specifico, ma che consideri l'analisi dell'intero ciclo di vita dei materiali utilizzati, con particolare attenzione alle sostanze nocive presenti nelle materie prime e nei rifiuti.

Irrinunciabilmente, quindi, la strategia passa per quella che è ormai prassi dovuta per legge: la raccolta differenziata, il riciclaggio e la valorizzazione delle risorse finora considerate come scarto inutilizzabile di produzione.

In questo contesto il trattamento della frazione organica dei rifiuti mediante digestione anaerobica assumerà certamente una funzione sempre più rilevante, consentendo la coesistenza tra il recupero di materia e il recupero di energia.

1.2 Generalità sul processo di digestione anaerobica

La degradazione biologica della sostanza organica in condizione di anaerobiosi (in assenza, cioè, di ossigeno molecolare, come O_2 , o legato ad altri elementi, come nel caso dell'azoto nitrico, NO_3^-), determina la formazione di diversi prodotti, i più abbondanti dei quali sono due gas: il metano ed il biossido di carbonio.

Essa coinvolge diversi gruppi microbici interagenti tra loro: i batteri idrolitici, i batteri acidificanti ed, infine, i batteri metanigeni, quelli cioè che producono metano e CO_2 , con prevalenza del gas di interesse energetico, che rappresenta circa i 2/3 del biogas prodotto. I batteri metanigeni occupano quindi solo la posizione finale della catena trofica anaerobica.

Il metano, poco solubile in acqua, passa praticamente nella fase gassosa, mentre la CO_2 si ripartisce in fase gassosa e nella fase liquida.

L'attività biologica anaerobica è stata evidenziata in un ampio intervallo di temperatura: tra -5 e $+70$ °C. Esistono, tuttavia, differenti specie di microrganismi classificabili in base all'intervallo termico ottimale di crescita: **psicrofili** (temperature inferiori a 20 °C), **mesofili** (temperature comprese tra i 20 °C ed i 40 °C) e **termofili** (temperature superiori ai 45 °C).

L'industrializzazione biotecnologica di questo processo naturale ha consentito di passare dall'iniziale concetto di stabilizzazione estensiva della sostanza organica in ambienti naturali a veri e propri processi industriali per la produzione di biogas. Ciò a partire da diversi substrati organici quali acque derivanti dall'industria agro-alimentare, fanghi di supero degli impianti di trattamento acque reflue, deiezioni animali, biomasse di natura agricola, residui organici industriali e la frazione organica di rifiuti solidi urbani.

1.3 Fasi del processo di digestione anaerobica

La conversione di substrati organici complessi in metano avviene, come accennato, attraverso una catena trofica anaerobica. Ad essa partecipano almeno tre gruppi metabolici distinti di microrganismi che si differenziano sia per i substrati che per i prodotti del loro metabolismo.

Il processo biodegradativo si compone delle seguenti fasi: una prima **fase di idrolisi** dei substrati complessi accompagnata da acidificazione con formazione di acidi grassi volatili, chetoni ed alcoli; una successiva **fase acetogenica**, in cui, a partire dagli acidi grassi, si ha la formazione di acido acetico, acido formico, biossido di carbonio ed idrogeno molecolare; ed, infine, un'ultima fase in cui, a partire dai prodotti della fase precedente, si osserva la **metanizzazione**, cioè la formazione di metano a partire dall'acido acetico, o attraverso la riduzione del biossido di carbonio utilizzando l'idrogeno come co-substrato. In minor misura si ha la formazione di metano a partire dall'acido formico (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Il processo di digestione anaerobica é schematicamente illustrato in figura 1.1 mentre l'insieme dei principali processi coinvolti nelle diverse fasi della digestione anaerobica e le diverse relazioni che intercorrono tra i diversi gruppi di batteri sono riportate in figura 1.2.

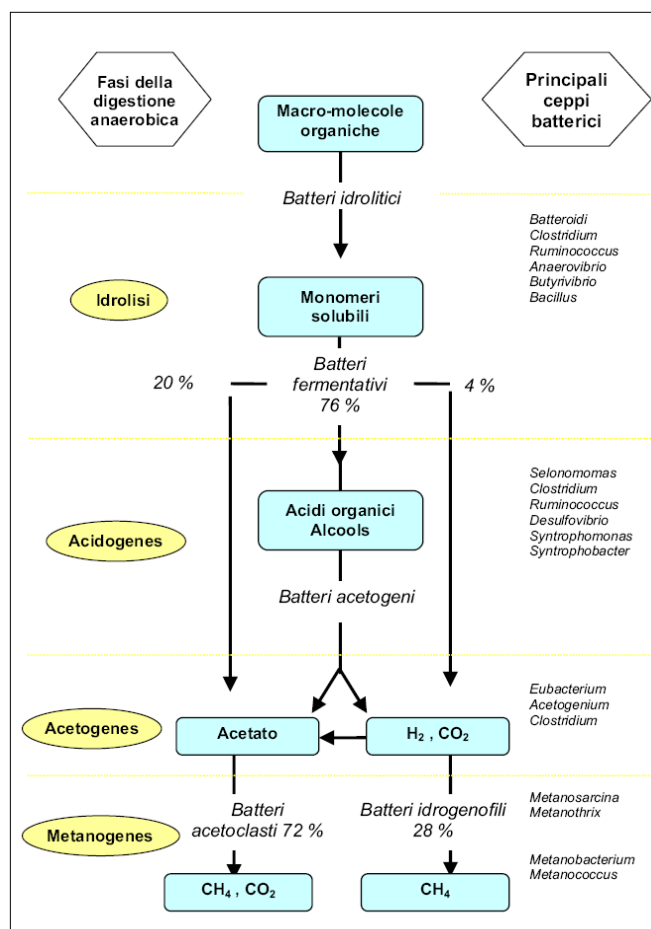


Figura 1.1 Schema generale del processo di digestione anaerobica (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

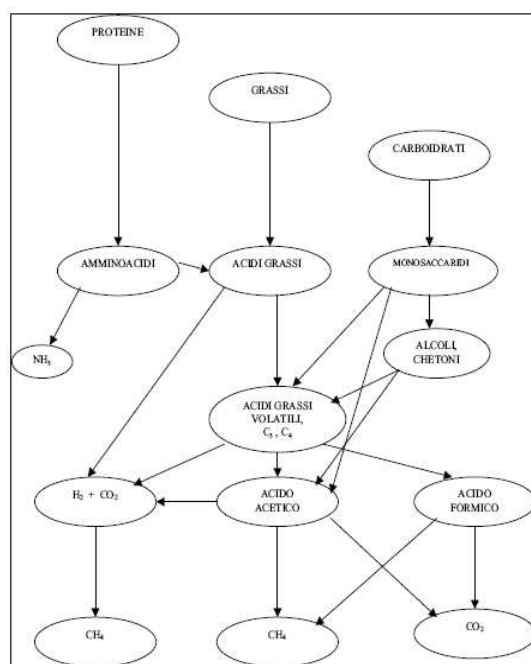


Figura 1.2 Diagramma delle fasi coinvolte nel processo di digestione anaerobica (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

La produzione di CH₄ rappresenta la conclusione della catena trofica anaerobica. Il metano infatti è l'unico composto non reattivo nell'intero processo di digestione anaerobica e può, pertanto, essere considerato il prodotto finale dell'intero processo (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

La produzione del metano può avvenire essenzialmente attraverso due differenti vie di reazioni: una via prevede la metanogenesi ad opera dei batteri che operano l'ossidazione anaerobica dell'idrogeno, mentre la seconda via, prevede la dismutazione anaerobica dell'acido acetico con formazione di metano e biossido di carbonio (vedi figura 1.2). La maggior parte della produzione di metano avviene attraverso questo secondo meccanismo.

La figura 1.3 quantifica percentualmente la distribuzione nei diversi cammini metabolici coinvolti nel processo di digestione.

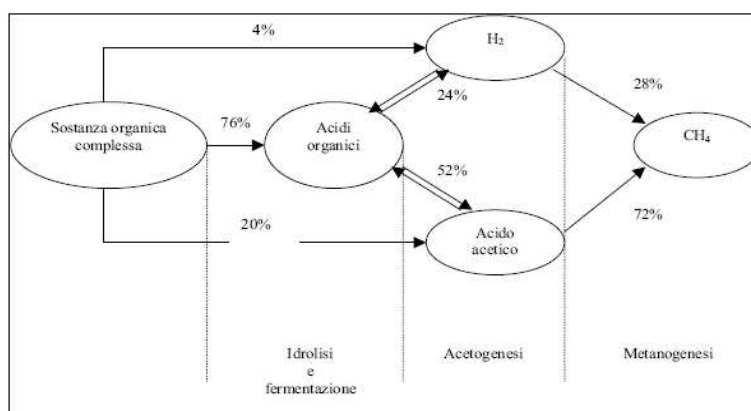


Figura 1.3 Schema di flusso dei diversi cammini metabolici della digestione anaerobica (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

1.3.1 Parametri di stabilità del processo

Come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), molto importante per il controllo del processo è il mantenimento di condizioni operative ottimali e stabili. La metanogenesi, che è la fase controllante l'intero processo, risulta particolarmente sensibile alle variazioni ambientali del mezzo di reazione.

Parametri che risultano di particolare importanza sono il pH, la concentrazione di acidi grassi volatili (VFA), l'alcalinità, il rapporto tra acidi grassi volatili ed alcalinità, la produzione e composizione percentuale del biogas e la temperatura. L'analisi di questi parametri deve in ogni caso essere complessiva, poiché la variazione di un singolo parametro, senza il monitoraggio di tutti gli altri, risulta difficilmente interpretabile (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Il **pH** fornisce un'indicazione della stabilità del mezzo di reazione; per valori compresi *tra* 6.5 e 7.5 il processo di digestione è in genere considerato stabile. Il valore del pH in un digestore è determinato essenzialmente dalla presenza di CO₂ nel mezzo liquido, quindi dalla sua pressione parziale nel biogas e dai valori di concentrazione degli acidi grassi volatili e dell'ammoniaca (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

L'**alcalinità (effetto tampone)** rappresenta la capacità di un sistema di neutralizzare protoni ed è generalmente espressa in termini di concentrazione di carbonato di calcio. Valori di alcalinità dell'ordine di 3000 ÷ 5000 [mg CaCO₃/litro] sono tipici per i digestori anaerobici operanti in condizioni stabili. Essendo i tassi di crescita della biomassa metanigena estremamente ridotti, può accadere che, a causa di un incremento del carico organico, le aumentate capacità idrolitiche ed acidificanti del sistema determinino uno sbilanciamento della popolazione batterica a favore della componente acidogenica e quindi a sfavore della componente metanigena.

Si assiste quindi ad una fase transitoria in cui si ha un incremento di concentrazione degli acidi grassi volatili. In tal caso la capacità tamponante del sistema deve essere in grado di neutralizzare l'abbassamento di pH determinato dall'accumulo degli acidi organici (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Il livello di concentrazione degli **acidi grassi volatili (VFA)**, generalmente espresso in termini di acido acetico o di COD, dipende dal tipo di substrato trattato e varia *da* ~200 a 2000 [mg acido/litro]. Si assume come parametro di stabilità la variazione di concentrazione: variazioni repentine con incremento della concentrazione indicano che il processo sta scivolando verso processi acidogenici piuttosto che metanogenici.

Si osserva (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)) che un incremento degli acidi volatili è conseguente all'aumentato carico di substrato da trattare, che determina l'accelerazione dei fenomeni idrolitici ed acidogenici con conseguente sbilanciamento della catena trofica e variazione del sistema verso condizioni di basso pH a seguito dell'esaurimento della capacità tamponante del mezzo.

La concentrazione degli acidi grassi volatili e l'alcalinità sono i due parametri che mostrano una più rapida variazione quando il sistema tende ad allontanarsi da condizioni di stabilità.

Giacché, in caso di problemi, la concentrazione degli acidi grassi tende ad aumentare, mentre l'alcalinità tende a diminuire, un utile parametro da considerare è il rapporto acidi grassi/alcalinità. Gli acidi grassi al numeratore sono espressi in termini di acido acetico, mentre l'alcalinità viene espressa in termini di concentrazione del carbonato di calcio. Valori del rapporto intorno a 0.3 indicano un'operatività stabile del digestore, mentre valori superiori possono indicare l'insorgere di problemi di instabilità (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Se il reattore opera in condizioni di stabilità, la **produzione e la composizione del biogas** risultano costanti. Una diminuzione nella produzione complessiva di biogas ed un aumento nella % di CO₂ possono indicare fenomeni di inibizione a danno della componente metanigena, dovuti all'eccessiva presenza di acidi grassi volatili. Si osserva che in presenza di eccessivi carichi di substrato la % di CO₂ tende a crescere a scapito della presenza di metano (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Una procedura poco utilizzata in ambito industriale (ma diffusa nella ricerca scientifica) è il monitoraggio del **contenuto di idrogeno nel biogas**, poiché ha solitamente una bassa concentrazione (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

L'effetto delle variazioni di **temperatura** è particolarmente importante: al variare della temperatura non si ha un semplice rallentamento o accelerazione dei processi metabolici, ma la sostituzione di popolazioni batteriche, che risultano presenti solo in alcuni intervalli ristretti di temperatura. Variazioni di soli 2÷3 °C possono influire sulle prestazioni generali del processo, soprattutto in prossimità dei limiti dell'intervallo operativo.

Si è riscontrato che i processi di digestione anaerobica in regime mesofilo mostrano le migliori produzioni di biogas in intervalli di temperatura *tra i 30 ed i 35 °C*, mentre quelli in regime termofilo nell'intervallo *tra i 40 ed i 60 °C* (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

1.3.2 Tossicità dell'ambiente di crescita

L'ottimizzazione del processo di digestione anaerobica, come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), deve essere condotta attraverso lo studio di tutti i fattori che contribuiscono positivamente o negativamente ad influenzare la resa del processo globale. La presenza di alcuni fattori può inibire o limitare sia la crescita del consorzio batterico che la resa di trasformazione del substrato nel prodotto finale.

In particolare, i metanigeni sono comunemente considerati i microrganismi più sensibili di tutto il consorzio batterico deputato alla conversione anaerobica delle sostanze organiche a metano, in quanto caratterizzati da una bassa velocità di crescita.

I parametri che possono influenzare negativamente l'intero processo di digestione anaerobica sono rappresentati dal substrato stesso e da eventuali elementi inibenti quali metalli pesanti, sali, azoto ammoniacale, residui di pesticidi e prodotti farmaceutici, detergenti e disinfettanti, solventi, inibitori da trattamenti chimici per la conservazione di cibi, ecc.

In alcuni casi, però, si è osservato come i batteri anaerobici siano in grado di tollerare alcune varietà di composti tossici e persino biodegradarne alcuni. Inoltre, si possono manifestare anche casi di acclimatazione alla tossicità e di reversibilità della stessa (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Tossicità da substrato: Come accennato in precedenza, il substrato stesso può costituire un fattore di inibizione in quanto la sua concentrazione può regolare e/o rallentare la velocità di reazione degli stadi successivi.

Anche alcuni intermedi metabolici che si formano durante il processo di metanizzazione possono limitare lo sviluppo degli stadi successivi, portando, quindi, ad un effetto globale negativo. Ad esempio, viene riportato in letteratura come alte concentrazioni di acidi grassi volatili (VFA) possano avere effetti tossici a causa della risultante diminuzione del pH (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Tossicità derivante da elementi inibenti: Tra i composti che possono in qualche modo inibire il normale decorso del processo di metanizzazione si possono annoverare l'acido solfidrico, l'azoto ammoniacale, la salinità, i clorurati, i disinfettanti quali formaldeide e fenoli, oltre a varie specie metalliche.

La formazione di **acido solfidrico** nei reattori anaerobici è il risultato della riduzione dei composti ossidati dello zolfo e della dissimilazione degli aminoacidi a base di zolfo. I batteri metanigeni possono tollerare concentrazioni di acido solfidrico fino a 1000 mg/kgTS anche se la capacità di produrre metano è seriamente compromessa anche a 200 mg/kgTS. La letteratura suggerisce che i solfato-riduttori competano con i metanigeni per il substrato e che, quindi, un'elevata concentrazione di zolfo ridotto sia un allarme di sbilanciamento del sistema. In generale le condizioni ottimali per i batteri metanigeni si hanno per concentrazioni di solfuri tra 8 e 22 mg/kgTS (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Inoltre per concentrazioni di ammoniaca superiori a 1500 mg/l, il comportamento del sistema può essere differente a seconda dell'adattamento o meno della biomassa; in generale è stato osservato che concentrazioni di **azoto ammoniacale** tra 1500 e 3000 mg/l sono inibenti a pH inferiore a 7.4, mentre concentrazioni superiori a 3000 mg/l sono tossiche per qualsiasi pH.

L'instaurarsi di un ambiente di reazione ad elevata **salinità** può influenzare negativamente il processo di digestione anaerobica. Si ha, infatti, una diminuzione della velocità di crescita dei batteri metanigeni fino al 50% nel caso di concentrazioni di NaCl da 250 a 500 mM, identificando con quest'ultimo il limite di tollerabilità. L'eccessiva salinità può portare ad uno squilibrio del processo con accumulo di VFA e blocco anche totale della metanogenesi (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

In alcuni casi la variazione in concentrazione di una sostanza tossica può renderla biodegradabile: è il caso della formaldeide e del fenolo (utilizzati come **disinfettanti**) che al di sotto di 400 e 2000 mg/l rispettivamente vengono velocemente convertite a metano per via anaerobica.

Per quanto riguarda la presenza di tracce di **metalli** (in particolare ferro, cobalto e nichel) essa è essenzialmente legata alla presenza di solfuri, i quali giocano un ruolo simile e complementare. In generale la ragione della tossicità degli ioni metallici è dovuta al fatto che essi inattivano un gran numero di enzimi.

Inoltre la correlazione tra la presenza di zolfo e la presenza di metalli pesanti è direttamente in relazione con il prodotto di solubilità dei rispettivi solfuri: ciò indica che la quantità di zolfo in soluzione influenza in maniera più o meno sensibile l'effetto tossico degli ioni in soluzione.

Studi eseguiti su digestori anaerobici di RU, come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), indicano che vi è una sensibile riduzione di acidi grassi volatili (da 4000 a 400 mg/l) allorché la concentrazione di ferro viene aumentata all'interno del digestore stesso. Simili effetti di riduzione della resa in metano possono essere attribuiti anche ad altri metalli quali zinco (limite di tossicità = 160 mg/l), rame (limite di tossicità = 170 mg/l), cromo e cadmio (limite di tossicità = 180 mg/l).

1.3.3 Substrati avviabili alla digestione anaerobica

Per ragioni impiantistiche, le matrici organiche tradizionalmente utilizzate per la produzione di biogas hanno un contenuto di umidità molto elevato, caratteristico degli effluenti zootecnici (3-10% di solidi totali o sostanza secca con 70-85% di solidi volatili o sostanza organica). Negli impianti di codigestione, invece, agli effluenti liquidi vengono aggiunte altre matrici organiche ad elevata densità energetica, derivate tipicamente da colture dedicate e sottoprodotti dell'industria agroalimentare, che hanno un contenuto di solidi totali che varia dal 15 al 35% e di solidi volatili che varia dall' 80 al 96% (Carbone, Fortunato (2009)).

Nel **centro-nord Italia** le colture maggiormente utilizzabili allo scopo sono: mais ceroso, sorgo zuccherino, triticale, segale e loiessa insilati in primo raccolto o in combinazione tra loro con la produzione di una coltura autunno-vernina seguita da un secondo raccolto. La combinazione del doppio raccolto deve essere attentamente valutata sulla base delle condizioni climatiche e del livello di meccanizzazione aziendale.

Nel **centro-sud**, invece, dove le possibilità irrigue sono inferiori, le colture che meglio si prestano sono i cereali a ciclo autunno-vernino (grano, orzo, triticale) oppure le colture a ciclo primaverile-estivo con basse esigenze idriche (girasole e sorgo zuccherino).

Allo stato attuale molti impianti sono dimensionati considerando una quota significativa del carico organico giornaliero da colture dedicate e sottoprodotti dell'agroindustria. Il loro utilizzo, infatti, permette di raggiungere potenze elettriche installate difficilmente conseguibili con i soli effluenti zootecnici, matrice storicamente utilizzata per gli impianti di digestione anaerobica.

Non ultimi, possono essere avviati alla digestione anaerobica anche i fanghi della depurazione civile e la frazione organica da raccolta differenziata dei rifiuti urbani domestici (FORSU) (Carbone, Fortunato (2009)).

L'utilizzo degli effluenti zootecnici per la trasformazione in biogas, in linea generale, non comporta problemi di tipo gestionale o economici.

Nel caso delle biomasse dedicate, invece, i problemi direttamente correlati al loro utilizzo riguardano: il costo di approvvigionamento e la necessità di aumentare le superfici per la distribuzione agronomica dell'azoto ad esse connesso, oltre alla necessità di strutture di stoccaggio che ne consentano una fruizione per un periodo più lungo rispetto a quello della disponibilità

Come rilevato da Carbone e Fortunato (2009), possono convenientemente essere utilizzate per la produzione di biogas le seguenti biomasse e scarti organici:

Liquame suino: questo tipo di effluente zootecnico è caratterizzato da un contenuto di sostanza secca o solidi totali (1-6%) e di sostanza organica o solidi volatili estremamente variabile a causa delle differenti tipologie di allevamento comunemente presenti sul territorio.

Per ottimizzare le rese è essenziale avviare alla digestione anaerobica deiezioni fresche, evitando stoccaggi intermedi.

Punti di forza sono la produzione regolare e continuativa, l'ottima propensione tecnica alla digestione anaerobica (purché non eccessivamente diluiti) in quanto ben dotati di sostanza organica, di buon potere tampone e privi di frazioni "inerti" non desiderate, la riduzione significativa delle emissioni di odori dallo stoccaggio del digestato.

Mediamente si producono 450-550 [m³/t SV] di biogas (di cui il 60-65% di metano).

Liquame bovino: le deiezioni bovine sono spesso rimosse dalle stalle utilizzando raschiatori. L'aggiunta di paglia, spesso effettuata nelle stalle, conduce a variazioni nel contenuto di solidi totali (8-15%). L'effetto di diluizione è minimo rispetto a quello che si ha con le deiezioni suine anche a causa del fatto che normalmente le zone calpestate dal bestiame vengono pulite e risciacquate con basse quantità di acqua. Come nel caso dei suini, anche nelle deiezioni bovine il contenuto di solidi totali dipende fortemente dal sistema di allevamento degli animali; anche in questo caso è opportuno che arrivino in impianto liquami bovini con un tenore di sostanza secca pari ad almeno il 7-8%.

Con tale liquame si producono mediamente 300-450 [m³/t SV] di biogas (di cui 55-60% metano).

Deiezioni avicole (pollina): tra le varie deiezioni avicole, la pollina di galline ovaiole è quella che più si presta alla digestione anaerobica, perché l'allevamento in gabbie non prevede l'uso di lettiera. Le deiezioni asportate fresche presentano un contenuto in solidi totali del 18-20% e alto contenuto di azoto. L'ammoniaca, che si libera in presenza di acqua per idrolisi enzimatica, può raggiungere alte concentrazioni e inibire il processo di digestione e dare luogo a forti emissioni nella fase di stoccaggio del digestato. Inoltre, frequentemente la pollina contiene inerti che sedimentando possono causare problemi operativi e ridurre il volume utile dei reattori.

Residui colturali e agroindustriali: l'industria agroalimentare produce ingenti quantità di reflui e scarti derivanti dalla lavorazione delle materie prime, avviabili alla digestione anaerobica: siero di latte, reflui liquidi di lavorazione dei succhi di frutta o di distillazione dell'alcool, bucce di pomodoro, scarti di lavorazione di patate, cipolle, mais, ecc.

Tali residui o scarti sono classificabili come "sottoprodotti" ai sensi dell'art. 183, comma 1, lettera n) del Dlgs 152/06 e del Dlgs n. 4/08.

La nuova definizione di “sottoprodotto” consente di sottrarre flussi qualitativamente validi per la digestione anaerobica dal contesto normativo dei “rifiuti”. Gli scarti e i residui avviati ad un altro ciclo produttivo (produzione del metano) per poter essere classificati sottoprodotto anziché rifiuto devono rispettare quanto di seguito enunciato:

- devono essere generati da un processo produttivo, pur non essendone l’oggetto principale;
- l’impiego in altro processo produttivo deve essere certo sin dalla fase della sua produzione e integrale. Il processo in cui lo scarto è reimpiegato deve essere preventivamente individuato e definito;
- il sottoprodotto deve avere caratteristiche merceologiche e di qualità ambientale tali da garantire che il suo uso non generi un impatto ambientale qualitativo e quantitativo diverso da quello ammesso e autorizzato nell’impianto di destinazione;
- le caratteristiche di compatibilità ambientale di cui sopra devono essere possedute dal sottoprodotto sin dal momento della sua produzione;
- il sottoprodotto deve avere un valore economico di mercato.

Tali sottoprodotti possono in genere essere acquistati dall’impianto di biogas ad un prezzo contenuto e variabile fra 5 e 15 €/t.

Culture non alimentari ad uso energetico: la coltivazione di piante specifiche da avviare alla digestione anaerobica per la produzione di biogas può essere, in Europa, una soluzione per ridurre la sovrapproduzione agricola, ma anche una valida alternativa per l’utilizzo di aree incolte e a riposo o di aree irrigate con acque di depuratori urbani.

Risulta doveroso in questa sede ricordare, però l’importanza di una regolamentazione in tal senso, per evitare quella che già oggi si sta prospettando come una competizione tra filiera agro-energetica e filiera agro-alimentare. Infatti spesso la possibilità di produrre energia e beneficiare così degli incentivi ad essa correlati, mette in secondo piano il problema dell’impegno di suolo, spesso fertile, e la sottrazione di superfici alla produzione alimentare. Per queste e per numerose altre ragioni è auspicabile una revisione della normativa in tal senso, al fine di assicurare uno sviluppo equilibrato e compatibile con le realtà agricole del territorio Italiano.

Nel corso degli ultimi anni, comunque, molti studi sono stati effettuati su mais, sorgo, foraggi e altre colture, per valutarne le caratteristiche ai fini del loro utilizzo energetico. Anche le tecnologie impiantistiche attualmente in via di sviluppo sono orientate all’introduzione di tali substrati nel digestore. L’uso delle colture energetiche come co-substrato, infatti, permette di ottimizzare la produzione di biogas e il riciclo dei nutrienti. Questo perché possono essere prodotte in azienda ed essere addizionate come co-substrati agli effluenti zootecnici direttamente o dopo insilamento e il digestato ottenuto a seguito del trattamento anaerobico può essere utilizzato per fertilizzare le aree agricole in cui le stesse vengono coltivate.

Scarti organici da macellazione: di interesse per la digestione anaerobica sono anche diversi scarti organici liquidi e/o semisolidi dell’industria della carne (macellazione e lavorazione della carne). Tali residui, ad esempio, possono essere addizionati come co-substrati nella digestione di liquami zootecnici e/o fanghi di depurazione.

Fanghi di depurazione: sono il residuo del processo di depurazione delle acque reflue urbane e industriali. Sono costituiti da biomassa batterica e da sostanza inerte, organica ed inorganica. In generale gli obiettivi della digestione anaerobica dei fanghi di depurazione sono: la stabilizzazione della sostanza organica, la distruzione degli eventuali microrganismi patogeni e la facilitazione per lo smaltimento finale.

Tale substrato non è consigliabile, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento, per la codigestione in impianti di biogas aziendali per liquami zootecnici.

Frazioni organiche di rifiuti urbani: nei rifiuti urbani domestici la percentuale di frazione organica umida è compresa in genere tra il 25 e il 35% in peso. La composizione media di questa frazione se derivante da raccolta differenziata secco-umido non differisce in modo sostanziale dall'organico raccogliibile da utenze selezionate, quali mercati all'ingrosso dell'ortofrutta e dei fiori, mercati ittici e rionali, esercizi commerciali di generi alimentari, punti di ristoro; la presenza di piccole quantità di plastica e vetro è in genere inferiore al 5% sul totale. Queste frazioni organiche presentano un elevato grado di putrescibilità ed umidità (> 65%) che le rendono adatte alla digestione anaerobica. Tale substrato non è consigliabile, a causa delle problematiche connesse alle attuali normative italiane di riferimento, per la codigestione in impianti di biogas aziendali per liquami zootecnici.

In Tabella 1.1 è riportata la resa indicativa in biogas di varie biomasse e scarti organici.

Materiali	m ³ biogas/t SV(*)
Deiezioni animali (suini, bovini, avi-cunicoli)	200 - 500
Residui colturali (paglia, collietti barbabietole, ecc.)	350 - 400
Scarti organici agroindustria (siero, scarti vegetali, lieviti, fanghi e reflui di distillerie, birrerie e cantine, ecc.)	400 - 800
Scarti organici macellazione (grassi, contenuto stomacale ed intestinale, sangue, fanghi di flottazione, ecc.)	550 - 1000
Fanghi di depurazione	250 - 350
Frazione organica rifiuti urbani	400 - 600
Culture energetiche (mais, sorgo zuccherino, erba, ecc.)	550 - 750

(*) Solidi volatili: frazione della sostanza secca costituita da sostanza organica.

Tabella 1.1 Biomasse e rifiuti organici per la digestione anaerobica e loro resa indicativa in biogas (m³ per tonnellata di solidi volatili) (CRPA (2006))

1.4 Stato dell'applicazione industriale della digestione anaerobica dei rifiuti solidi urbani in Italia e in Europa

1.4.1 La digestione anaerobica dei rifiuti: lo stato dell'arte in Europa

Sulla scorta delle esperienze acquisite nel trattamento industriale dei fanghi di depurazione, la digestione anaerobica dei rifiuti urbani in Europa affonda le proprie radici agli inizi degli anni '80 con i primi impianti pilota realizzati in Belgio e in Francia, cui è seguita, soprattutto a partire dalla metà degli anni '90, una costante crescita delle installazioni e delle capacità di trattamento. Oggi, come sottolineato da Confalonieri (2010), pur lontano dai consolidati sistemi basati su compostaggio e biostabilizzazione, il trattamento anaerobico dei rifiuti urbani rappresenta una realtà diffusa e localmente prevalente nell'Europa centro-settentrionale e in Paesi, quali la Spagna, che hanno potuto usufruire di consistenti contributi economici dall'UE per muoversi con decisione su questa strada.

La Scuola Agraria del Parco di Monza (Confalonieri (2010)) ha aggiornato alle informazioni disponibili alla fine del 2008, un censimento degli impianti di digestione anaerobica dei rifiuti urbani condotto nell'ambito di una collaborazione biennale con il Dipartimento Ambiente, Salute e Sicurezza dell'Università dell'Insubria e finanziata dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.

L'elaborazione complessiva dei dati acquisiti porta a valutare a fine 2008 la presenza, in 15 Paesi europei, di 180 impianti di digestione anaerobica di rifiuto urbano, 167 dei quali con capacità di trattamento superiori a 3.000 t/a e con quantità di rifiuto urbano (RSU o FORSU) trattate maggiore del 10% delle matrici organiche totali digerite.

Sono 141 gli impianti deputati al trattamento di oltre 4 milioni le tonnellate di FORSU "in purezza" (circa 2,3 milioni di tonnellate) o in co-digestione con altri scarti organici (complessivamente poco meno di 2 milioni di tonnellate). Rilevante anche il dato relativo agli impianti di trattamento meccanico-biologico anaerobico di RSU indifferenziato (2,8 milioni di tonnellate), sul quale però è bene sottolineare l'elevata percentuale di scarto prodotto prima dell'avvio a digestione (tipicamente nell'ordine del 40-60%). Minoritaria è invece la quota di FORSU trattata in co-digestione con RSU (circa 470.000 t/a su un totale di 5 impianti), probabilmente ascrivibile a situazioni in evoluzione dal punto di vista dello sviluppo locale di sistemi di raccolta differenziata delle frazioni organiche, che crescono e sostituiscono progressivamente le matrici indifferenziate (Confalonieri (2010)).

Dal punto di vista tecnologico, si rileva in generale una maggior quota di impianti ad umido rispetto a quelli a secco, evidente soprattutto nella gestione di matrici derivanti da raccolta differenziata. Non si osservano decisi orientamenti rispetto al regime termico, in parte anche in ragione della carenza di dati sugli impianti ad umido. Riguardo i dati combinati, si nota infine una prevalenza di impianti wet-mesofili o dry-termofili, sia nel trattamento dei rifiuti indifferenziati che nel trattamento di matrici selezionate.

Gli impianti monofasici, infine, rappresentano circa l'88% del totale; dimostrando da parte degli operatori una maggiore propensione al contenimento dei costi complessivi rispetto alla ricerca della massimizzazione delle rese energetiche.

La resa di produzione di biogas e, di conseguenza, di generazione di energia, riflettono una combinazione di diverse scelte tecnologiche e processistiche (regime termico, contenuto di solidi totali, tempi di ritenzione, numero di fasi, ...), nonché delle tipologie di rifiuti o miscele avviate a trattamento. Un sostanziale filtraggio dei dati disponibili (Confalonieri (2010)) ha consentito di pervenire ad un campione, omogeneo per completezza di informazioni, di 36 impianti alimentati con rifiuti provenienti da raccolte differenziate (FORSU). Sul campione selezionato si osserva un'elevata dispersione dei dati, con rese medie di produzione di biogas di $67 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ di rifiuto trattato.

Elaborando i dati rispetto ai soli impianti termofili, le rese medie salgono a circa $79 \text{ Nm}^3/\text{ton}$; considerando invece i soli impianti a secco, la resa media è pari a $86 \text{ Nm}^3/\text{ton}$. Sul trattamento di RSU indifferenziato, la quasi totalità dei dati disponibili è relativa a rese di produzione riferite alla frazione organica effettivamente avviata a digestione, e si colloca in omogeneamente intorno a $127 \text{ Nm}^3/\text{ton}$. Ipotizzando che tale frazione rappresenti approssimativamente, il 40-60% del rifiuto in ingresso agli impianti, la resa specifica di produzione si attesta quindi intorno a $51\text{-}76 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ di rifiuto trattato (Confalonieri (2010)).

1.4.2 La situazione in Italia

Il nostro Paese ha iniziato a muoversi in modo deciso verso l'approccio integrato anaerobico/aerobico solo negli ultimi anni. Rispetto ad un esiguo numero di impianti "storici", alcuni dei quali convertiti dal trattamento dei rifiuti indifferenziati a quello della FORSU, si osserva oggi un deciso incremento delle iniziative avviate o in corso di definizione (Confalonieri (2010)).

Ad oggi, risultano operativi una dozzina di impianti con significative capacità di trattamento, ed almeno altrettanti sono in fase di autorizzazione e realizzazione.

Vale la pena di rilevare che, dai dati forniti dai gestori degli impianti, le rese energetiche del rifiuto organico nazionale appaiono decisamente superiori al dato medio europeo (Confalonieri (2010)). Tra gli altri fattori, vogliamo qui sottolineare che, a differenza di altri Paesi nei quali la digestione anaerobica è ormai ampiamente sviluppata, i sistemi di raccolta differenziata italiani tendono ad una separazione degli scarti di cucina, a maggiore contenuto di sostanza organica putrescibile, dai rifiuti verdi derivanti dalla manutenzione di giardini, caratterizzati da rese di trasformazione anaerobica generalmente trascurabili.

Seguendo la logica dell'integrazione di approcci, sono proprio le aziende oggi operative nel settore del compostaggio le principali interessate all'implementazione di tecnologie anaerobiche, spinte dagli incentivi economici per la produzione di energie rinnovabili, dalla possibilità di aumentare le proprie capacità di trattamento, di ridurre gli impatti ambientali complessivi e, di conseguenza, le cause di attriti con le popolazioni circostanti. Nella possibilità di integrazione anaerobico/aerobico sono stati rimarcati finora gli aspetti premianti della digestione rispetto al solo compostaggio. Vale la pena di rimarcare inoltre alcuni aspetti che rendono, se non indispensabile, estremamente opportuno il post-trattamento aerobico del digestato prodotto nella fase anaerobica.

La possibilità di un utilizzo diretto in agricoltura del digestato va attentamente considerata alla luce delle caratteristiche di questo rifiuto.

Fisicamente assimilabile ad un fango (generalmente un rifiuto semi-solido o semi-liquido), il digestato necessita infatti, come ancora riportato da Confalonieri (2010), di adeguate strutture di contenimento e stoccaggio preliminarmente allo spandimento, che ne rendono problematica la gestione soprattutto in situazioni o periodi nei quali l'attività di fertilizzazione non sia consentita o possibile. Se dal punto di vista delle caratteristiche agronomiche se ne riconosce un'elevata dotazione di azoto a pronta cessione, sono tuttavia da considerare le problematiche ambientali derivanti dall'applicazione di digestato in pieno campo alla luce delle prescrizioni contenute nella direttiva Nitrati, che impone limiti annuali di carico di azoto per unità di superficie nelle cosiddette aree vulnerabili.

Il digestato, opportunamente condizionato (tramite centrifugazione per allontanare la fase liquida ed aumentare il tenore di sostanza secca) e miscelato con strutturante ligno-cellulosico, attraverso un processo semplificato di compostaggio condotto in ambiente confinato può conseguire:

- l'allontanamento dell'ammoniaca in eccesso;
- l'igienizzazione grazie allo sviluppo di calore del processo aerobico;
- la riduzione sostanziale dell'umidità in eccesso;
- il raggiungimento degli standard qualitativi dell'ammendante compostato ai sensi della normativa sui fertilizzanti (D.lgs 217/06).

Tale pratica, che richiama di fatto una breve fase di maturazione di 4-6 settimane, semplifica notevolmente la gestione del prodotto, ampliandone potenzialmente il mercato di applicazione (Confalonieri (2010)).

Numero di Paesi ospitanti impianti	15
Impianti operativi	180
di cui autorizzati a trattare oltre 3.000 t/a e che trattino rifiuto urbano (RSU o FORSU) per almeno il 10% della capacità complessiva	167
Capacità complessiva impianti di digestione RSU (t/a)	2.803.500
Capacità complessiva impianti di digestione FORSU (t/a)	2.267.700
Capacità complessiva impianti di co-digestione FORSU + altre matrici (t/a)	1.968.400
Capacità complessiva impianti di co-digestione RSU + FORSU + altre matrici (t/a)	473.400

Tabella 1.2 I numeri dell'impiantistica anaerobica in Europa (Confalonieri (2010))

	Wet		Semi-Dry		Dry		n.d.		TOT	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Mesofilo	37	13	0	0	10	7	0	0	47	20
Mesofilo/Termofilo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Termofilo	16	1	2	0	36	10	2	0	57	11
Mesofilo+Termofilo	8	1	0	0	0	0	0	0	8	1
n.d.	24	6	0	0	5	0	0	1	29	7
TOT	85	22	2	0	51	17	2	1	140	40

(1) = impianti alimentati con Forsu (+altre matrici)

(2) = impianti alimentati con RSU (+ altre matrici, compresa FORSU)

Tabella 1.3 Impianti alimentati con FORSU o RSU + altre biomasse (Confalonieri (2010))

Località	Capacità autorizzata
Montello (BG)	165.000
Voghera (PV)	27.000
Villanova del Sillaro (LO)	31.500
Pinerolo (TO)	81.000
Villacidro (CA)	39.600
Viareggio (LU)	1.500
Badia (BZ)	600
Campo di Trens (BZ)	600
Rodendo (BZ)	150
Lana (BZ)	17.000
Bassano del Grappa (VI)	61.600
Cesena (FC)	30.000
Este (PD)	235.000
Camposampiero (PD)	53.500
Lozzo Atesino (PD)	60.000
Treviso	3.000*

*riferito alla sola FORSU; l'impianto tratta principalmente fanghi di depurazione

Tabella 1.4 Impianti di digestione anaerobica operativi in Italia (dati ISPRA e Scuola Agraria del Parco di Monza - Confalonieri (2010))

1.5 Processi di digestione a fase unica

I diversi processi a fase unica di digestione anaerobica della frazione organica dei RSU corrispondono essenzialmente alle diverse soluzioni tecnologiche e di processo oggi brevettate. Questi processi, così come presenti sul mercato, vengono distinti in base al tenore di solidi che caratterizza il rifiuto trattato (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

1.5.1 Digestione wet

Questo processo, come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), è stato il primo ad essere utilizzato nel trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani dal momento che sfruttava le conoscenze acquisite in decenni di attività nel processo di digestione anaerobica dei fanghi di supero negli impianti di trattamento acque reflue.

Nei processi di tipo wet il rifiuto di partenza viene opportunamente trattato e diluito al fine di raggiungere un tenore in solidi totali inferiore al 10% attraverso il ricorso a diluizione con acqua così da poter poi utilizzare un classico reattore completamente miscelato del tipo applicato nella stabilizzazione dei fanghi biologici negli impianti di depurazione.

In generale, il processo prevede, dopo la fase di pretrattamento del rifiuto, finalizzata alla rimozione di plastiche ed inerti e di corpi grossolani che potrebbero danneggiare gli organi meccanici del reattore, uno stadio di miscelazione in cui si ottiene una miscela con caratteristiche omogenee e l'opportuno contenuto in solidi.

La diluizione può avvenire tramite aggiunta di acqua di rete o dal parziale ricircolo dell'effluente del reattore (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

La figura 1.8 riporta un tipico schema di processo ad umido.

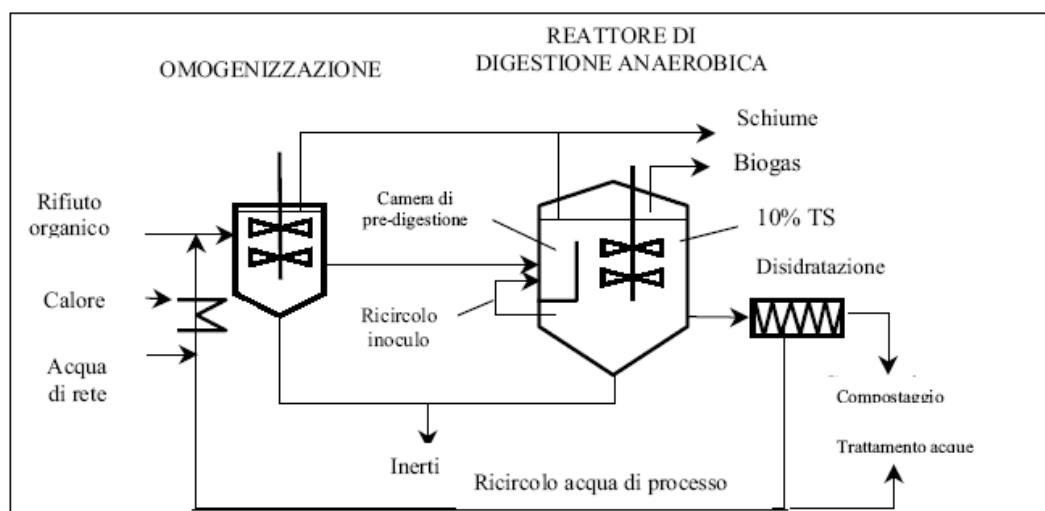


Figura 1.4 Tipico schema di processo wet a fase singola (APAT GDL (2005))

A causa delle caratteristiche fisiche dei rifiuti trattati non è solitamente possibile ottenere una miscela omogenea e pertanto si osserveranno all'interno del reattore tre fasi separate, caratterizzate da distinte densità. La frazione più pesante tenderà ad accumularsi sul fondo del reattore e può determinare danni nel sistema di miscelazione se il rifiuto trattato non è sufficientemente pulito, mentre materiali leggeri e schiume si accumulano nella parte superiore del reattore. La fase a densità intermedia è quella in cui avvengono per lo più le effettive reazioni di degradazione e produzione del biogas.

Nella gestione dell'impianto sono generalmente previste saltuarie rimozioni sia dello strato più pesante, presente sul fondo del reattore, che di quello leggero.

Uno dei problemi che può essere connesso con la digestione anaerobica ad umido consiste nella cortocircuitazione idraulica del reattore: cioè, il flusso di materiale entrante, non perfettamente miscelato con il materiale già presente nel reattore, fuoriesce con tempi di ritenzione ridotti rispetto a quelli previsti da progetto. Ciò, oltre a determinare una minore degradazione del substrato trattato, e quindi una minor produzione di biogas, può determinare problemi di igienizzazione dei fanghi effluenti. Per questo motivo alcuni brevetti prevedono uno step di pastorizzazione dell'effluente dal reattore di digestione (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

I tipici vantaggi e svantaggi dei processi di digestione ad umido, evidenziati in anni di applicazione, sia dal punto di vista tecnologico, biologico che economico/ambientale, sono riportati in tabella 1.4.

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Buona conoscenza ed esperienza nel campo del processo; Applicabilità in co-digestione con rifiuti liquidi ad alto contenuto in sostanza organica;	Corto-circuitazione idraulica; Fasi separate di materiale galleggiante e pesante; Abrasione delle parti meccaniche dovuta alla presenza di sabbie ed inerti; Pre-trattamenti di preparazione del rifiuto complessi;
Biologico	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato e/o sostanze tossiche influenti il reattore;	Forte sensibilità ad eventuali shock per la presenza di sostanze inibitorie e carichi organici variabili che entrano in contatto intimo con la biomassa; Perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pre-trattamenti;
Economico ed ambientale	Spese ridotte per i sistemi di pompaggio e miscelazione, ampiamente diffusi sul mercato.	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per i pre-trattamenti e per i volumi dei reattori; Produzione di elevate quantità di acque di processo.

Tabella 1.4 Vantaggi e svantaggi dei processi wet (Vandevivere et al. (2001) - APAT GDL (2005))

Come evidenziato dal GDL APAT (2005), i processi wet operano generalmente con carichi organici piuttosto bassi, inferiori a 6 kgVS/m³giorno, tipicamente nell'intervallo 2-4 kgVS/m³giorno.

Non è attualmente ancora chiaro quale sia il fenomeno che limita la possibilità di applicare carichi organici maggiori nei processi ad umido. Una possibile spiegazione consiste nella concentrazione della biomassa attiva nel reattore, che sarebbe troppo bassa per operare al meglio.

Altre spiegazioni chiamano in causa la velocità di trasferimento di massa dei nutrienti oppure l'accumulo di sostanze inibenti come ad esempio l'ammoniaca o gli acidi grassi volatili a catena corta.

Qualora i digestori vengano alimentati con carichi organici superiori si osserva subito una diminuzione nella produzione del biogas. Per questo motivo si ritiene che la più valida delle spiegazioni sia la presenza/formazione di sostanze inibenti nel reattore, conseguente appunto all'incremento dei carichi da trattare.

E' chiaro che reattori in cui la biomassa è totalmente dispersa in un mezzo liquido (reattori completamente miscelati, CSTR) sono particolarmente soggetti a problemi di inibizione, dal momento che biomassa e sostanze inibenti sono in intimo contatto. Per contro, occorre evidenziare che la situazione può essere facilmente ricondotta alla normalità per semplice aggiunta di acqua e conseguente diluizione.

Alcune esperienze, condotte per lo più a scala pilota, hanno permesso di evidenziare valori tipici per questo tipo di processo.

La tabella 1.5 riporta i valori tipici sia per quanto concerne i parametri di processo che le rese per processi wet a fase unica.

Parametro di processo	Intervallo
Solidi nel rifiuto trattato, %TS	10, fino al 15
Carico organico, kgVS/m ³ d	2-4, fino a 6
Tempo di ritenzione idraulica, d	10-15, fino a 30
Rese del processo	
Produzione biogas, m ³ /t rifiuto	100-150
Produzione specifica di biogas, m ³ /kgVS	0.4-0.5
Velocità di produzione di biogas, m ³ /m ³ d	5-6
Contenuto di metano, %CH ₄	50-70
Riduzione della sostanza volatile, %	50-60, fino a 75

Tabella 1.5 Intervalli tipici dei parametri di processo e rese dei processi wet (APAT GDL (2005))

1.5.2 Digestione semi-dry

Come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), in questo tipo di processo il contenuto di sostanza solida che caratterizza il rifiuto trattato si pone nell'intervallo intermedio rispetto ai processi wet e dry: opera infatti con rifiuti con un contenuto in solidi del 15-20%. Dal punto di vista impiantistico la soluzione adottata è quella di un reattore miscelato (CSTR) che può operare tanto in regime mesofilo che termofilo.

Il rifiuto organico proveniente da raccolta differenziata presenta caratteristiche che sono generalmente ottimali per l'applicazione diretta del processo, ricorrendo solamente a semplici pretrattamenti di pulizia del rifiuto con eliminazione del materiale ferroso e di quello inerte grossolano seguito da triturazione e miscelazione.

Operando invece con rifiuti organici derivanti da raccolta indifferenziata con un elevato contenuto di sostanza solida, e derivanti dalla separazione meccanica di RU indifferenziato, è necessario procedere ad un pretrattamento di pulizia del rifiuto piuttosto spinto e poi a diluizione del rifiuto con acqua, che potrà essere, di volta in volta, acqua di processo riciclata, o acqua fresca.

Nel caso in cui un impianto tratti rifiuto indifferenziato sarà necessaria ovviamente una filiera di pretrattamento per la separazione della frazione organica da inviare ai digestori anaerobici. Lo schema di pretrattamento prevede diversi passaggi e può essere anche complesso. Ciò comporta inevitabilmente la perdita di parte del materiale organico biodegradabile, che può arrivare al 15-25% in termini di sostanza volatile.

La linea di pretrattamento dovrà poi provvedere ad un'opportuna purificazione del rifiuto in maniera da eliminare i rifiuti inerti quali metallo, sassi, vetro e sabbie che darebbero problemi agli organi di miscelazione nel reattore. Anche in questo processo, come nei processi di tipo wet, si osserva la formazione di tre fasi distinte all'interno del reattore, anche se, in generale, il fenomeno è meno accentuato. Sarà comunque necessario prevedere, di tanto in tanto, lo svuotamento e la pulizia del fondo del reattore.

Il sistema di miscelazione è generalmente garantito da miscelatori meccanici che possono essere inoltre coadiuvati da lance a gas che provvedono a ricircolare il biogas prodotto per incrementare l'efficienza di miscelazione.

Può essere inoltre previsto il ricircolo del materiale presente nel digestore inviato alla caldaia e poi reimpresso nei digestori.

I principali vantaggi e svantaggi del processo semi-dry sono richiamati in tabella 1.6.

Il principale vantaggio economico di questo tipo di processo consiste nella possibilità di ricorrere a mezzi di pompaggio e miscelazione ampiamente diffusi sul mercato e quindi disponibili a basso costo. Per contro, devono essere previsti maggiori costi di investimento per la fase di pretrattamento, specialmente se il rifiuto viene conferito tal quale all'impianto.

Le volumetrie del reattore sono minori rispetto ai sistemi wet ma in ogni caso superiori a quelle dei sistemi dry.

Complessivamente, quindi, i costi d'investimento per i sistemi semi-dry e dry risultano confrontabili. Dal punto di vista ambientale un problema può essere dovuto all'acqua eventualmente necessaria per diluire rifiuti organici con concentrazioni di sostanza secca superiore al 20-25% TS.

La necessità di aumentare i volumi trattati con acqua determina maggiori spese per il riscaldamento del flusso entrante e per il mantenimento del reattore alla temperatura desiderata. L'energia ed il calore prodotti dalla combustione del biogas sono in ogni caso più che sufficienti all'autosostentamento energetico del reattore (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Semplicità dei sistemi di pompaggio e miscelazione; Possibilità di trattare il rifiuto da raccolta differenziata senza particolari pre-trattamenti;	Accumulo di materiali inerti sul fondo del reattore e necessità di scaricarli; Abrasione delle parti meccaniche; Pre-trattamenti complessi per RU indifferenziato;
Biologico	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato o sostanze tossiche;	Sensibilità ad eventuali shock per la presenza di sostanze inibitorie e carichi organici; Perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pre-trattamenti del rifiuto indifferenziato;
Economico ed ambientale	Spese ridotte per i sistemi di pompaggio e miscelazione.	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per i pre-trattamenti e per i volumi dei reattori; Produzione di elevate quantità di acque di processo.

Tabella 1.6 Vantaggi e svantaggi dei processi semi-dry (CITEC (2000) - APAT GDL (2005))

Come evidenziato dal GDL APAT (2005), sperimentazioni in scala pilota condotte con frazione organica selezionata meccanicamente ed opportunamente diluita hanno dimostrato la possibilità di operare ad OLR fino a 18 kgVS/m³giorno in regime termofilo (55°C) con tempi di ritenzione idraulica di soli 6 giorni.

In queste condizioni il reattore pilota presentava produzioni specifiche di biogas pari a 0.36 m³/kgVS, una velocità di produzione del biogas di 6.3 m³/m³giorno con una percentuale di metano del 55%.

Le rimozioni della sostanza volatile erano nell'intervallo 40-48%.

Operando con frazione organica da raccolta differenziata o residui mercatali, caratterizzati da un elevato contenuto di sostanza volatile, i carichi applicabili erano minori: tipicamente nell'intervallo 6.0-12.6 kgVS/m³giorno.

In questo caso la produzione specifica di biogas cresceva fino a 0.5 m³/kgVS, mentre la velocità di produzione del biogas era sempre di 6 m³/m³giorno. La percentuale di rimozione della sostanza volatile era prossima al 60%.

Nella digestione semi-dry anche il regime termico del sistema gioca un ruolo significativo. Si è evidenziato in particolare come, a parità di carico organico applicato e di tempo di ritenzione idraulico, il passaggio da regimi mesofili a quelli termofili consentisse di incrementare notevolmente le rese in termini di biogas prodotto da 0.2 a 0.4 m³/kgVSgiorno ed una riduzione della sostanza volatile dal 20 al 50% (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

La tabella 1.7 riassume gli intervalli tipici dei parametri di processo e delle rese dello stesso.

Parametro di processo	Intervallo
Solidi nel rifiuto trattato, %TS	15-20, fino a 25
Carico organico, kgVS/m ³ d	8-12, fino a 18 in termofilia
Tempo di ritenzione idraulica, d	10-15
Rese di processo	
Produzione biogas, m ³ /t rifiuto	100-150
Produzione specifica di biogas, m ³ /kgVS	0.3-0.5
Velocità di produzione biogas, m ³ /m ³ d	3-6
Contenuto di metano, %CH ₄	55-60
Riduzione della sostanza volatile, %	40-50, fino al 60

Tabella 1.7 Intervalli tipici dei parametri di processo e rese dei processi semy-dry (APAT GDL (2005))

1.5.3 Digestione dry

Come riportati dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), nel corso degli anni ottanta varie sperimentazioni dimostrarono come, oltre ai processi ed alle tecnologie di tipo wet e semi-dry, fosse possibile ricorrere a processi in cui il rifiuto organico veniva trattato nella sua forma originale, senza bisogno di diluizioni.

Quindi, mentre prima gli impianti di digestione anaerobica erano esclusivamente di tipo wet, nell'ultimo decennio si è osservata la crescita del sistema dry, e le nuove realizzazioni sono oggi equamente ripartite tra queste due tecnologie, con prevalente crescita del processo dry.

Nei processi dry il tenore in solidi del rifiuto alimentato al digestore è generalmente nell'intervallo 25-40% e pertanto solamente particolari rifiuti con elevato tenore di solidi (>50%) necessitano di essere diluiti con acqua per poter essere convenientemente trattati.

Ciò non comporta significative variazioni dal punto di vista biochimico e microbiologico nel processo anaerobico, ma determina la necessità di una completa revisione dei metodi di trattamento per quanto concerne la tecnologia dei reattori. Sono infatti necessari particolari metodi di pompaggio e miscelazione.

Infatti, a causa delle proprietà reologiche dei flussi trattati, il materiale organico viene trasportato con nastri e pompato attraverso il ricorso a speciali pompe appositamente progettate per operare con flussi molto viscosi. Ciò incide sui costi di realizzazione di questo tipo di impianti.

Questi sistemi sono in grado di operare con flussi di materiale molto concentrati e resistono ai possibili problemi causati da sassi, vetro o legno che non causano inceppamenti o danni.

L'unico pretrattamento richiesto è una preliminare vagliatura al fine di rimuovere il materiale con dimensioni superiori ai 40 mm. Ciò è ottenuto grazie a vagli a tamburo nel caso di rifiuto organico separato meccanicamente, e mediante trituratori nel caso di rifiuto organico raccolto separatamente alla fonte.

Dal momento che i pretrattamenti sono limitati non si osserva perdita di materiale organico biodegradabile come può invece avvenire nel corso dei pretrattamenti per materiale da trattare con processi wet e semi-dry.

A causa dell'elevata densità e viscosità dei flussi trattati i reattori per il trattamento dry non sono del tipo completamente miscelato (CSTR), ma con flusso parzialmente o totalmente a pistone (plug-flow): ciò rende i reattori più semplici dal punto di vista meccanico, ma comporta problemi di miscelazione tra il rifiuto organico fresco e la biomassa fermentante.

La risoluzione di questo problema è fondamentale per evitare fenomeni localizzati di sovraccarico organico ed eventuale acidificazione che porterebbe ad inibizione del processo metanigeno. Il fatto di operare con flussi molto densi porta inoltre al superamento del problema della suddivisione in tre fasi distinte all'interno del reattore, come poteva invece avvenire nei processi wet e semi-dry (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Le principali tecnologie presenti sul mercato ed i processi adottati per questo tipo di rifiuti si differenziano essenzialmente per la fluidodinamica del reattore utilizzato.

La figura 1.9 riporta alcune possibili soluzioni impiantistiche.

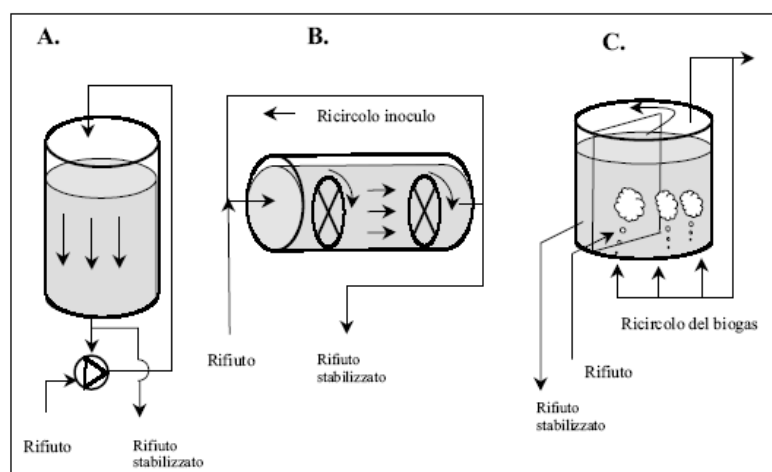


Figura 1.5 Differenti tipologie di reattore nei sistemi dry (A = processo Dranco; B = processo Kompogas; C = processo Valorga) (Vandevivere et al., (2001) - GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

Nel processo **Dranco** la miscelazione tra rifiuto influente e biomassa avviene grazie al ricircolo dell'effluente estratto dal fondo dal digestore anaerobico che viene pompato nella parte superiore del reattore stesso: il tipico rapporto di ricircolo è una parte di rifiuto fresco per sei parti di effluente ricircolato. Questo tipo di processo ha dimostrato di operare con efficacia con rifiuti con un tenore in solidi nell'intervallo 20-50% (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Il processo **Kompogas** utilizza un reattore cilindrico in cui il flusso a pistone prosegue orizzontalmente. Il moto di avanzamento del materiale trattato è assistito da miscelatori a lenta rotazione posti internamente al reattore che omogeneizzano il materiale trattato, lo degasano, e risospendono il materiale inerte grossolano.

Il sistema ha dimostrato di operare con buona efficienza quando il rifiuto trattato presenta concentrazioni in solidi del 25%: per valori inferiori si è osservata la tendenza all'accumulo di materiale inerte grossolano (sabbie e vetro) sul fondo del reattore, mentre per concentrazioni maggiori si osserva un'eccessiva resistenza al flusso orizzontale del materiale all'interno del reattore (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Un altro processo dry, diffuso in centro Europa, è il processo **Valorga**. Anche in questo caso si ricorre a reattori di forma cilindrica in cui il flusso a piste del materiale trattato è di tipo circolare e la miscelazione avviene grazie all'iniezione di biogas dal fondo del reattore attraverso una serie di iniettori ogni 15 minuti circa.

La miscelazione sembra avvenire con notevole efficacia dal momento che il ricircolo di parte dell'effluente si è dimostrato non necessario. D'altra parte gli iniettori di biogas, a causa della loro posizione, possono essere soggetti a problemi di intasamento (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Come nel caso del processo Kompogas c'è la necessità di ricircolare l'acqua di processo al fine di raggiungere una concentrazione di sostanza solida del 30% nel rifiuto da trattare.

Per contro, concentrazioni più basse, fino al 20% TS, determinerebbero seri problemi di accumulo di materiale inerte sul fondo del reattore.

Dal punto di vista economico si evidenzia (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)) come nel caso dei processi di tipo dry gli elevati costi di investimento iniziale sono dovuti alla necessità di dotarsi di sistemi di trasporto e pompaggio del rifiuto organico da trattare che siano particolarmente resistenti e tecnologicamente avanzati.

Per contro, operando con rifiuti ad elevata concentrazione di sostanza solida, non sono necessari pretrattamenti particolarmente raffinati ed i volumi dei reattori necessari sono ridotti: quindi le spese di costruzione dei reattori sono minori rispetto ai processi wet e semi-dry. La ridotta dimensione del reattore si ripercuote poi favorevolmente, in fase di esercizio, sul bilancio energetico dello stesso, dal momento che è necessario riscaldare una minor quantità di rifiuto da trattare.

Una differenza fondamentale tra i processi di tipo dry e quelli di tipo wet o semi-dry consiste nel ridotto utilizzo, nel caso di processi dry, di acqua per la diluizione dei rifiuti. Ne consegue che la quantità d'acqua di scarico sarà ridotta.

I principali vantaggi e svantaggi dei processi dry sono richiamati in tabella 1.8.

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Nessun bisogno di miscelatori interni al reattore; Robustezza e resistenza ad inerti pesanti e plastiche; Nessuna corto circuitazione idraulica;	Rifiuti con basso tenore in sostanza solida (< 20%TS) non possono essere trattati da soli;
Biologico	Bassa perdita di sostanza organica biodegradabile nei pre-trattamenti; Elevati OLR applicabili; Resistenza a picchi di concentrazione di substrato o sostanze tossiche;	Minima possibilità di diluire sostanze inibitorie e carichi organici eccessivi con acqua fresca;
Economico ed ambientale	Pre-trattamenti minimi e più economici; Ridotti volumi dei reattori; Ridotto utilizzo di acqua fresca; Minime richieste di riscaldamento del reattore.	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per il trattamento.

Tabella 1.8 Vantaggi e svantaggi dei processi dry (Vandevivere et al. (2001) - APAT GDL (2005))

Come evidenziato dal GDL APAT (2005), uno dei maggiori problemi connessi ai processi di tipo dry può essere rappresentato dal rischio di squilibrare il processo verso la fase acidogenica, a causa degli elevati carichi organici applicati ai reattori, quando la frazione organica è caratterizzata da un elevato grado di biodegradabilità. Il livello del problema resta in ogni caso confrontabile con quello riscontrabile in processi wet o semi-dry, se condotti con procedure inopportune.

In ogni caso è stata documentata (Oleskiewicz, Poggi-Varaldo (1997) - GDL APAT (2005)), la capacità dei sistemi dry di resistere senza alcun problema ad instabilità del processo di digestione: non si osserva inibizione da accumulo di ammoniaca nel processo termofilo Dranco per rifiuti che abbiano un rapporto carbonio/azoto maggiore di 20. Lo stesso tipo di risultato è stato riportato per i processi di tipo wet in ambiente mesofilo. In generale la stabilità rispetto ad elevate concentrazioni di ammoniaca nel reattore è stata ampiamente dimostrata nelle operazioni in piena scala.

Una delle possibili spiegazioni per la capacità dei sistemi dry di sopportare shock derivanti da carichi di ammoniaca risiede probabilmente nel fatto che la miscelazione non perfetta ed omogenea tipica di questi processi sottopone solo una parte della biomassa metanigena, in zone limitate del reattore, a queste condizioni di stress (APAT GDL (2005)).

I diversi sistemi oggi operanti sul mercato sembrano comportarsi in maniera simile dal punto di vista delle rese di processo: la produzione di biogas varia nell'intervallo 90-150 m³/t di rifiuto. Il valore più basso corrisponde a rifiuti di giardinaggio e verde pubblico, mentre il valore più elevato fa riferimento a rifiuto organico di origine alimentare. Queste rese sono equivalenti a 210-300 m³CH₄/tVS con percentuali di rimozione della sostanza volatile nell'intervallo 50-70%. La percentuale di sostanza volatile rimossa è quindi simile a quella ottenibile con processi wet e semi-dry che rientrano nell'intervallo 40-70%.

La differenza più evidente tra i diversi processi dry, e tra i sistemi dry e quelli wet e semi-dry, è invece osservabile in termini di carico organico applicato ai reattori (OLR) ed ai suoi massimi valori raggiungibili. E' infatti possibile operare con carichi organici prossimi ai 10 kgVS/m³giorno. Nell'ambito dei processi dry la tecnologia Valorga opera generalmente con OLR prossimi ai 5 kgVS/m³giorno (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

La tabella 1.9 riporta i tipici valori di esercizio e le rese dei processi dry.

Parametro di processo	Intervallo
Solidi nel rifiuto trattato, %TS	25-40
Carico organico, kgVS/m ³ d	8-10
Tempo di ritenzione idraulica, d	25-30
Rese di processo	
Produzione biogas, m ³ /t rifiuto	90-150
Produzione specifica di biogas, m ³ /kgVS	0.2-0.3
Velocità di produzione biogas, m ³ /m ³ d	2-3
Contenuto di metano, %CH ₄	50-60
Riduzione della sostanza volatile, %	50-70

Tabella 1.9 Intervalli tipici dei parametri di processo e rese dei processi dry (APAT GDL (2005))

1.5.4 Processi Batch

Come riportato dal GDL APAT (2005), nei processi batch, il reattore di digestione viene riempito con materiale organico ad elevato tenore di sostanza solida (30-40% TS), in presenza o meno di inoculo, e viene quindi lasciato fermentare, senza necessità di mescolazione del substrato.

Il percolato che si produce durante il processo degradativi viene continuamente ricircolato.

I principali vantaggi e svantaggi riconducibili a questa tecnologia sono riportati in tabella 1.10.

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Semplice; Tecnologicamente semplice; Robusto;	Può subire intasamenti; Necessita di bulking agent; Rischi di esplosività durante la fase di caricamento del reattore;
Biologico	Affidabilità di processo;	Rese di biogas ridotte a causa dell'incanalamento nel corpo del reattore; minimi OLR applicabili;
Economico ed ambientale	Economico; Applicabile in Paesi in via di sviluppo; Ridotto utilizzo di acqua.	Elevata necessità di superficie (confrontabile con il compostaggio).

Tabella 1.10 Vantaggi e svantaggi dei processi dry (Vandevivere et al. (2001) - APAT GDL (2005))

Riguardo ai sistemi di digestione a batch e a secco, come riportato dal CRPA (2006), un rinnovato interesse è derivato dalla diffusione dell'utilizzo delle colture energetiche e del trattamento della FORSU, per la quale tali sistemi paiono essere particolarmente adatti (oltre che per il trattamento dei letami bovini, suini e avicoli). Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi sistemi "batch" senza mescolamento meccanico (di cui solo pochi esempi sono però operativi su scala aziendale e vengono di seguito riportati sinteticamente tratti da CRPA (2006)).

Biocel - Il processo Biocel, sviluppato in Olanda, è un esempio di processo batch che opera con substrati ad alto tenore di solidi, in regime mesofilo, che vengono introdotti nel reattore unitamente ad inoculo e vengono lasciati all'interno, senza alcuna agitazione, sino alla cessazione della produzione di biogas (che generalmente avviene dopo più di 40 giorni).

Il percolato prodotto durante il processo di digestione viene riscaldato e ricircolato nella massa del substrato fermentante. Il primo impianto di questo tipo operante in scala reale dal 1997 è l'impianto di Lelystad, in Olanda, che tratta 50.000 ton/anno di frazione organica proveniente da raccolta differenziata dei rifiuti urbani ed è in grado di raggiungere produzioni di biogas intorno a 70 m³/ton di rifiuto.

Bekon - Un altro esempio di digestione batch, a secco con percolazione è la tecnologia tedesca della Bekon, recentemente brevettata.

La tecnologia Bekon è un processo "batch" monostadio, che è in grado di generare biogas da biomasse con contenuto di sostanza secca fino al 50%; tali biomasse vengono caricate all'interno del digestore unitamente ad un inoculo, quindi lasciate fermentare in condizioni strettamente controllate di assenza di ossigeno e inoculate nuovamente anche a processo avviato mediante aggiunta di liquido di percolazione che viene ricircolato attraverso un sistema di distribuzione posto alla sommità del reattore stesso.

A differenza dei processi di fermentazione ad umido, nessun sistema di agitazione è necessario durante la digestione; la temperatura della massa di substrato e del liquido di percolazione è mantenuta costante sia grazie ad un sistema di riscaldamento integrato alla base del digestore che ad uno scambiatore di calore posto nella vasca di raccolta del percolato di ricircolo. L'assenza di sistemi di pompaggio o mescolamento rende la tecnologia complessiva estremamente semplice sotto il profilo meccanico e soprattutto minimizza le richieste energetiche. Le rese di biogas, a detta della Bekon, sono comprese nel range 100-180 m³/t, a seconda del tipo di substrato trattato. I digestori sono strutturati in modo compatto, con pavimenti a tenuta di gas e possono essere caricati e svuotati con attrezzature di uso comune (pale gommate, pale caricatori frontali), operazioni durante le quali sistemi di sicurezza dedicati impediscono l'ingresso di aria nei digestori e l'instaurarsi di condizioni di atmosfera esplosive.

Marcopolo - Relativamente ai sistemi batch, la Marcopolo Engineering S.p.A. Sistemi Ecologici, ha messo a punto una tecnologia, brevettata come MESEFO, di digestione anaerobica termofila in bioreattori statici. La tecnologia MESEFO, sviluppata per il trattamento sia di rifiuti organici da raccolta differenziata che di fanghi urbani e agroindustriali che di altre biomasse, ha come caratteristica principale quella di effettuare la digestione (che dura in media 40 giorni) in condizioni stazionarie, senza movimentazione alcuna del materiale.

Il percolato prodotto viene ricircolato all'interno del reattore. Prima di essere inviati nuovamente alla biocella, i flussi di percolato vengono opportunamente trattati in apposito serbatoio sia per quanto riguarda la temperatura di processo sia per quanto riguarda la carica microbica; quest'ultima viene infatti accuratamente controllata mediante aggiunte di microrganismi che vengono selezionati e scelti sia in base alle caratteristiche chimiche del substrato trattato sia in base alla fase del processo in cui il percolato stesso si trova ad essere ricircolato (bioattivazione).

Ciascuna cella è dotata di un sistema di captazione del biogas prodotto (parte del quale viene anche ricircolato all'interno della massa trattata) oltre ad un sistema di ventilazione-aerazione che permette il controllo degli odori durante le operazioni di carico e il convogliamento dei flussi d'aria captati in biofiltri a fine ciclo.

Questa tecnologia non necessita di pre-trattamenti spinti del materiale in ingresso che può essere caricato alle biocelle anaerobiche anche in presenza di residui di plastica, vetro, sassi, pezzi di legno o inerti di pezzatura grossolana; tali materiali, infatti, possono essere rimossi a fine digestione, prima dell'ulteriore eventuale stabilizzazione mediante compostaggio aerobico del digestato.

Tra le tecnologie wet, semi-dry e dry, quella che risulterà vincente nel prossimo futuro sarà quella che avrà la capacità di ottenere ottime rese in termini di produzione di biogas e riduzione dei volumi di fanghi da smaltire in relazione al tipo di rifiuto trattato. Il tutto con un soddisfacente recupero di energia e calore riutilizzabili.

2. L'integrazione tra la digestione anaerobica e il compostaggio

2.1 La frazione organica dei rifiuti solidi urbani

E' opportuno, prima di affrontare l'argomento specifico del presente lavoro di tesi, un inquadramento della matrice di riferimento: il rifiuto urbano.

Esso rappresenta uno dei flussi solidi più importanti da inviare a smaltimento, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo. Si possono quindi evidenziare tre tipologie di frazione organica dei RU, ognuna con caratteristiche diverse a seconda del sistema di raccolta (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)):

- indifferenziata con separazione meccanica;
- differenziata proveniente da grandi utenze (mense, mercati, ecc.);
- differenziata di provenienza domestica.

Queste tre matrici presentano evidenti differenze fisiche e chimiche, oltre che biologiche.

La selezione meccanica della frazione organica è stata utilizzata in maniera abbastanza estesa nel nostro paese durante gli ultimi 20 anni, con il duplice scopo di ottenere una frazione organica con buone caratteristiche di putrescibilità ed una frazione di materiale ad alto potere calorifico da utilizzare come combustibile (CDR, combustibile derivato dai rifiuti). Le caratteristiche della frazione organica da selezione meccanica sono influenzate dal tipo di impianto di produzione, oltre che, ovviamente, dalla qualità del materiale in ingresso e, purtroppo, non sono disponibili in letteratura molti dati di caratterizzazione di queste matrici.

La frazione organica proveniente da raccolta differenziata, analizzata dal punto di vista progettuale in questa sede, può essere suddivisa in due tipologie: quella proveniente da *grandi utenze* e quella di *provenienza domestica*. Questi due tipi di frazione organica sono, generalmente, trattati assieme non esistendo, nel nostro paese, una differenziazione nella strategia di raccolta. E' tuttavia possibile, sul piano analitico, evidenziare delle differenze tra i due substrati.

La frazione organica proveniente da grandi utenze è normalmente caratterizzata da un grado di selezione piuttosto elevato. E' pertanto evidente che il contenuto in secco della frazione organica da raccolta differenziata, intesa come miscela di grandi utenze o di rifiuti domestici, può essere anche molto variabile, in relazione al peso relativo della componente di residui di cucina ed ortofrutticoli.

Analizzando i dati presentati nella letteratura tecnica e tentando di dare un quadro complessivo sulla caratterizzazione chimico-analitica di questa matrice, si può affermare che mediamente la frazione organica da raccolta differenziata presenta un intervallo caratteristico di tenore in secco che va dal 10% (tipico dei rifiuti mercatali) fino al 20-25%, tipico dei rifiuti di mensa. La percentuale in volatili rimane pressoché costante, indipendentemente dalla composizione merceologica, intorno al 85-90% dei TS; analogamente, per i nutrienti si riscontrano valori del 2-3% TS per entrambi (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Parametro	Intervallo	Valore tipico
Umidità, %	72,6 - 79,6	74,4
Sostanza solida Totale (TS), %	21,4 - 27,4	25,6
Sostanza solida Totale Volatile (TVS), % TS	91,3 - 99,7	96,5
Sostanza Organica (TCOD), gCOD/gTS	1,1 - 1,3	1,2
Azoto (TKN), % TS	2,6 - 3,7	3,2
Fosforo Totale, % TS	0,13 - 0,28	0,2

Una nota a parte va fatta riguardo alle possibili influenze derivanti dalla stagionalità sul substrato. A tale scopo può essere utile considerare i dati riportati in tabella 2.1 che riporta una sintesi dei risultati ottenuti riguardo alla caratterizzazione chimico fisica del rifiuto, ottenuta durante un anno di sperimentazione. Per questo substrato sono anche disponibili i contenuti in acidi grassi volatili, prodotti a seguito di fenomeni naturali di fermentazione che sono dell'ordine di alcune migliaia di mg/l, a testimoniare il veloce instaurarsi di fenomeni di prefermentazione già nelle fasi di stoccaggio.

Ciò che risulta evidente dall'analisi dei dati riportati, considerando in particolare quelli relativi alla fase solubile è che la stagionalità del substrato non sembra influire in modo determinante sulle caratteristiche, che rimangono su valori contenuti in intervalli relativamente ristretti.

	Ottobre - gennaio	Febbraio - maggio	Maggio - giugno	Giugno - luglio	Luglio - agosto	Agosto - settembre	Settembre - novembre	Novembre - dicembre	Dicembre - febbraio
T°, C	12.6	7.5	21.4	22.2	24.5	23.1	15.1	8.8	7.1
pH	4.7	4.9	5.0	4.7	4.0	4.32	4.3	4.3	5.0
TS, g/kg	95.4	93.6	96.3	94.7	88.6	105.8	103.4	102.6	97.3
TVS, %TS	91.5	94.5	89.2	88.9	90.0	92.2	90.6	90.9	91.2
TCOD, g/kg	99.2	101.3	100.4	88.7	95.5	108.6	106.7	108.5	101.7
SCOD, g/kg	39.3	53.3	45.1	44.4	42.7	49.7	51.7	51.2	60.1
TVFA, mgCOD/l	4092	4256	3948	3410	4062	7563	3023	3931	4563
TKN, g/kg	-	-	-	-	23.2	23.4	23.1	23.2	21.5
Ptot, g/kg	-	-	-	-	3.9	3.7	3.7	3.8	3.5

Tabella 2.1 Caratteristiche chimico-fisiche della frazione organica analizzate durante il periodo di un anno (Zorzi 1997 - APAT GDL (2005))

Dai dati di letteratura (APAT GDL (2005)), si ricavano inoltre i seguenti intervalli di produzione, espressi sia in termini di metano che di biogas prodotto. Considerando una percentuale del 55% di metano sul biogas prodotto si possono ottenere i valori riportati in tabella 2.2, in cui si notano i valori notevolmente inferiori della frazione organica selezionata meccanicamente rispetto agli altri substrati.

Substrato:	Frazione organica da selezione meccanica	Frazione organica proveniente da grandi utenze	Frazione organica di provenienza domestica
B ₀ , m ³ CH ₄ /kgTVS	0.16-0.37	0.45-0.49	0.37-0.40
G ₀ *, m ³ /kgTVS	0.29-0.66	0.81-0.89	0.67-0.72

Tabella 2.2 Rese di conversione a tempo infinito per i tre tipi di frazione organica (APAT GDL (2005))

In sede di progettazione esecutiva risulta quindi necessario, come evidente dall'analisi preliminare condotta, condurre un'attenta valutazione della matrice specifica inviata a digestione. Grazie alle analisi di laboratorio dei campioni convogliati all'impianto saranno possibili eventuali correzioni ai parametri operativi, in modo da non incorrere in problemi operativi iniziali, frequenti cause di manutenzione delle fasi di pretrattamento, e da ottimizzare l'efficienza di estrazione del biogas secondo i valori di dimensionamento a regime.

2.2 Il biogas: una fonte energetica rinnovabile

Il biogas è una miscela composta da metano, in genere per il 60-75% con gli effluenti zootecnici, e da anidride carbonica, con tracce di idrogeno solforato e umidità elevata, derivante dalla degradazione in ambiente anaerobico (assenza di ossigeno) della sostanza organica.

Con 1 m³ di biogas è possibile produrre 1,8-2 kWh di energia elettrica e 2-3 kWh di energia termica. Il biogas, dopo essere stato purificato a metano al 95%, può anche essere utilizzato per autotrazione e/o immesso nella rete di distribuzione del metano (tale uso del biogas non è attualmente incentivato in Italia, a differenza degli altri biocarburanti, biodisel e bioetanolo).

Nel caso invece di produzione di sola energia elettrica il limite è sempre stato rappresentato dalla scarsa convenienza economica a immagazzinare la produzione di biogas in eccesso rispetto ai consumi elettrici aziendali.

Fra i substrati avviabili alla digestione anaerobica, descritti in precedenza, vi è appunto la frazione organica di rifiuti urbani (FORSU), per la quale la percentuale di frazione organica umida è compresa in genere tra il 25 e il 35% in peso.

La composizione media di questa frazione, se derivante da raccolta differenziata secco-umido, non differisce in modo sostanziale dall'organico raccogliibile da utenze selezionate, quali mercati all'ingrosso dell'orto-frutta e dei fiori, mercati ittici e rionali, esercizi commerciali di generi alimentari, punti di ristoro (pizzerie, ristoranti, ristorazione collettiva); la presenza di piccole quantità di plastica e vetro è in genere inferiore al 5% sul totale. Queste frazioni organiche presentano un elevato grado di putrescibilità ed umidità (> 65%) che le rendono adatte alla digestione anaerobica.

Come accennato, il recupero energetico da biomasse è uno degli assi portanti della riduzione del prelievo di fonti fossili e può contribuire in forma determinante alla riduzione dei gas serra.

In questo scenario lo sfruttamento del biogas a fini energetici acquista una notevole importanza sia quando prodotto a partire dalla frazione organica dei rifiuti, sia quando prodotto attraverso colture energetiche dedicate.

La percentuale di metano nel biogas varia a seconda del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo. La composizione del biogas spiega il suo alto potere calorifico (variabile tra i 20.000 e i 24.000 kJ/Nm³) e la conseguente valorizzazione energetica a livello termico, elettrico, combinato (elettrico-termico) e meccanico. La digestione anaerobica di circa 25mila ton/anno di rifiuto organico da RD è in grado di alimentare un generatore della potenza di 1MWe (in grado di soddisfare il fabbisogno energetico di circa 2.500 famiglie).

La resa energetica, ovvero la produzione specifica di biogas, varia a seconda delle caratteristiche delle biomasse impiegate. Spesso le biomasse di diversa origine vengono trattate in co-digestione (ad esempio i rifiuti urbani vengono trattati assieme agli scarti agroalimentari). In alcuni casi, però, la possibilità della co-digestione deve essere attentamente valutata per evitare di ottenere un digestato non di qualità (come nel caso della miscelazione ad es. con fanghi di depurazione da distretti con immissioni industriali nel sistema fognario).

La trasformazione del biogas in energia può avvenire per:

- combustione diretta in caldaia, con produzione di sola energia termica;
- combustione in motori azionanti gruppi elettrogeni per la produzione di energia elettrica;
- combustione in cogeneratori per la produzione combinata di energia elettrica e termica;
- uso per autotrazione come metano al 95%;
- immissione nella rete del gas naturale.

In Europa, il biogas viene principalmente trasformato in energia elettrica, anche perché spesso le normative nazionali prevedono incentivi economici per i chilowattora prodotti a partire da fonti energetiche rinnovabili.

Eppure l'alto prezzo raggiunto dai carburanti tradizionali (diesel e benzina) e gli obiettivi dell'Unione europea di riduzione dei gas serra rendono interessante l'uso del biogas (opportunamente depurato) nel settore dei trasporti. In alcuni paesi europei (Svezia, Svizzera e Austria) l'uso del biometano per l'autotrazione è già una realtà. In Svezia, ad esempio, circa il 17% del biogas è destinato alla produzione di biocarburanti (percentuale destinata a salire oltre il 20%). Anche la Svizzera è particolarmente avanzata per quanto riguarda l'uso del biogas nel settore dei trasporti: oltre ai distributori di metano tradizionali, si stanno diffondendo dei distributori che erogano un gas costituito per il 50% da biometano.

Negli ultimi anni i biocarburanti hanno conosciuto una discreta diffusione, anche se più di recente l'aumento del prezzo dei prodotti agricoli destinati al mercato alimentare ha imposto una riflessione sulla convenienza di dedicare spazi agricoli a colture energetiche piuttosto che a colture dedicate alla produzione alimentare.

Resta il fatto che nella digestione anaerobica, l'impiego di colture dedicate risulterebbe economicamente più conveniente, sia per quanto riguarda il processo di digestione anaerobica che per la depurazione del biogas (necessaria per ottenere un gas sufficientemente ricco di metano per essere utilizzato come combustibile). Dato l'elevato contenuto energetico per ettaro di terreno coltivato, il biometano potrebbe rappresentare un complemento o fare concorrenza alla produzione di altri tipi di biocombustibili, come il biodiesel e bioetanolo.

La *cogenerazione* ha il vantaggio di produrre sia energia termica che elettrica, favorendo l'utilizzo di maggiori quantità di biogas a copertura dei vari fabbisogni aziendali. Anche in questo caso, però, per avere un coefficiente di utilizzazione del 100% bisognerebbe dimensionare l'impianto in modo da produrre solo il biogas effettivamente necessario alle attività dell'azienda. In alternativa, ed è il caso più frequente, si può cedere l'energia elettrica in eccesso rispetto ai fabbisogni aziendali alla rete elettrica nazionale.

2.2.1 Produzione di biogas

Come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), la produzione di biogas costituisce uno dei principali vantaggi della digestione anaerobica dei rifiuti, grazie al consistente recupero energetico che si riesce a conseguire tramite il suo utilizzo. Pertanto l'intero processo deve essere condotto in maniera tale da massimizzare le rese di metanizzazione.

La portata all'uscita dal digestore può presentare però delle variazioni importanti, dal 60 al 140% della portata media. A ciò corrisponde anche una variazione della qualità del biogas prodotto, il cui tenore in metano può oscillare dal 45 al 65%.

Queste variazioni sono dovute alla differente velocità di degradazione dei diversi componenti della materia organica degradabile. Infatti, poco dopo l'introduzione del substrato nel digestore, i primi componenti si degradano, producendo un biogas molto ricco di anidride carbonica, mentre gli altri componenti si degradano più tardi con produzione di un biogas più ricco in metano. I due parametri, portata e concentrazione di CH₄, variano in senso opposto: durante il caricamento del digestore si ha una grande portata di biogas a basso contenuto di metano, mentre lontano del caricamento, durante il week-end per esempio, si ha una portata ridotta ma ricca di metano.

Il rendimento in biogas del processo, espresso in termini di m³/kgTVS alimentati, è molto variabile e dipende dalla frazione biodegradabile del substrato.

Infatti non tutta la sostanza organica presente nel digestore viene convertita in biogas, ma solo una sua frazione, come rappresentato nella figura 2.1, che illustra la trasformazione del substrato durante il processo di digestione anaerobica.

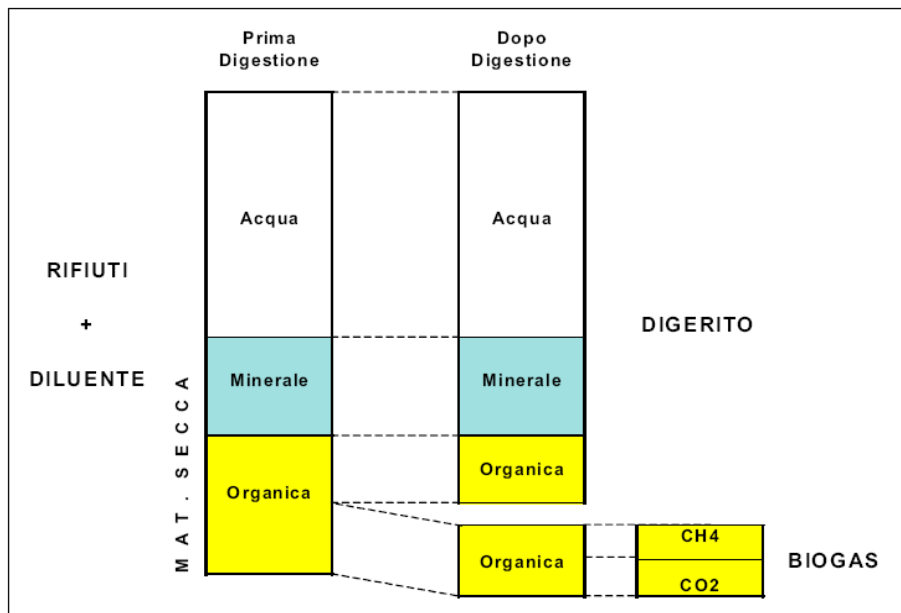


Figura 2.1 Trasformazione del substrato nel digestore (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

Nella tabella 2.4 sono riportati i dati di rendimento in biogas disponibili in letteratura relativi ai diversi substrati ed ai differenti tipi di processo, distinti in base al contenuto in solidi nel reattore ed al diverso regime termico.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-umido	Processo secco	Processo umido	Processo semi-umido	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	0.17-0.23	0.23-0.30	0.35-0.45	0.20-0.30	0.30-0.41	0.35-0.45
Frazione organica da raccolta differenziata	0.65-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70	0.60-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70

Tabella 2.4 Valori del rendimento in biogas [m³/kgTVS] nei vari processi (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

Nella tabella 2.5 sono, invece, riportate le principali caratteristiche del biogas.

Componenti	Percentuale
Metano (CH ₄)	55 – 65 %
Anidride carbonica (CO ₂)	35 – 45 %
Idrogeno solforato (H ₂ S)	0,02 – 0,2 %
Vapore d'acqua	saturazione
Idrogeno, ammoniaca	tracce
Ossigeno, azoto	tracce

Tabella 2.5 Composizione del biogas (concentrazioni su gas secco) (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

Tutte le tubazioni e le apparecchiature devono essere realizzate con opportuni materiali che tengano conto del carattere corrosivo di alcuni componenti, in particolar modo dell'idrogeno solforato. All'uscita del digestore deve essere prevista una filtrazione per eliminare le particelle liquide o solide che potrebbero essere trascinate dal biogas. Questo semplice sistema permette di proteggere le soffianti o i compressori che verranno utilizzati per l'alimentazione del gas ai successivi utilizzi (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

2.2.2 Depurazione del biogas

Prima dell'utilizzo a fini energetici il biogas deve essere sottoposto ad opportuni trattamenti di depurazione, infatti la presenza di anidride carbonica, azoto ed acqua provoca l'abbassamento del potere calorifico della miscela, mentre sostanze come l'idrogeno solforato ed i composti organici alogenati, che possono essere presenti nel biogas, si comportano da agenti corrosivi, causando sensibili danni agli impianti di utilizzazione.

La scelta del trattamento o dei trattamenti più opportuni dipende sia dalle caratteristiche del biogas che dalle modalità di utilizzo previste.

I principali trattamenti a cui è necessario sottoporre il fluido prima dell'alimentazione ai gruppi di produzione d'energia sono finalizzati ad ottenere un sensibile abbassamento dei costi di conduzione e manutenzione delle macchine, un funzionamento ottimale ed una maggior affidabilità, oltre alla garanzia di rispetto dei limiti di emissione imposti dalla legge (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Deumidificazione: Il trattamento di deumidificazione è necessario in quanto l'umidità, di cui il biogas è saturo, può condensare all'interno delle tubazioni, in seguito a variazioni di temperatura e/o pressione, provocando malfunzionamenti.

Il sistema di deumidificazione è costituito generalmente da un gruppo frigorifero in grado di raffreddare il gas da inviare ai motori. In tal modo si separa dalla miscela gassosa l'umidità che, condensando, viene allontanata precipitando al contempo sostanze nocive e corrosive presenti nel flusso gassoso stesso (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Desolforazione: Come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), quando i livelli di idrogeno solforato sono elevati è necessario prevedere dei sistemi di abbattimento integrativi, ad umido o a secco, della sola deumidificazione.

Per quanto riguarda i *sistemi ad umido*, questi possono essere assimilati alle torri di lavaggio (scrubber) normalmente utilizzate per la depurazione delle emissioni gassose.

Un primo sistema utilizza una reazione chimica, generalmente in condizioni di pressione e temperatura ambiente. Il trattamento consiste nel lavaggio con una soluzione basica, che neutralizza l' H_2SO_4 , composto altamente corrosivo e quindi pericoloso per gli impianti di utilizzazione, formato dall' H_2S . Una successiva fase di lavaggio acido permette di neutralizzare l'eccesso di base prima dello scarico della soluzione. Il principale vantaggio di questo sistema è la semplicità, ma il costo dei reattivi e del trattamento dell'acqua scaricata ne riduce l'impiego industriale.

Un altro sistema, poco diffuso, consiste nel lavaggio con acqua sotto pressione che mette in soluzione l' H_2S insieme alla CO_2 . Tale miscela viene poi rilasciata in una successiva fase di stripping.

Il *sistema* di desolforazione *a secco* prevede un processo di trattamento di tipo chimico e consiste nel far passare il biogas attraverso una sostanza adsorbente. Una prima opzione consiste in un sistema che utilizza un adsorbente contenente *ossidi di ferro* in grado di interagire con l'acido solfidrico e captarlo in modo da separarlo dal biogas. Un'altra opzione prevede l'utilizzo del *carbone attivo*.

Il volume della massa desolforante dipende dai seguenti parametri: concentrazione dell' H_2S nei gas da trattare; pressione e temperatura; velocità di attraversamento del gas nella massa adsorbente; tempo di contatto massa – gas; ciclo di sostituzione dell'adsorbente.

I due sistemi si differenziano in quanto la rigenerazione dell'ossido di ferro è più facile rispetto a quella del carbone attivo. Infatti, l'ossido di ferro si riforma dalla reazione con l'aria e con l'acqua in cui si libera lo zolfo solido che viene trascinato via.

Una semplice filtrazione permette la sua eliminazione. La sostituzione della massa di ossido di ferro si deve effettuare solo dopo molti cicli di rigenerazione.

Nel caso del carbone attivo, invece, la rigenerazione richiede l'utilizzo di solventi e, anche se viene condotta a regola d'arte, il carbone rigenerato perde parte della sua efficacia rispetto a quello di partenza, pertanto il costo della rigenerazione e la sostituzione frequente del carbone attivo rendono questa soluzione applicabile solo nei casi in cui si ha una concentrazione molto ridotta in H_2S .

Un terzo sistema consiste nell'utilizzo di un biofiltro nel quale risiedono numerose specie di microrganismi in grado di degradare i composti solforati, in questo caso, la depurazione del gas

dipende principalmente da porosità, temperatura, pH, umidità e dalla concentrazione di H_2S nella fase gassosa. Nonostante i costi di gestione siano contenuti, questo sistema non è ancora molto utilizzato industrialmente (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

2.2.3 Utilizzo del biogas

Essendo la produzione di biogas continua, tutti i sistemi di raccolta ed utilizzo devono essere automatici. La produzione di biogas avviene alla pressione del digestore, generalmente vicina alla pressione atmosferica.

Dal momento che lo stoccaggio ed il trasporto richiedono una compressione importante e quindi costi non trascurabili, si cerca in genere di utilizzarlo per la produzione di una forma d'energia direttamente utilizzabile sul sito di produzione o con costi di trasporto ridotti (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Parte del biogas prodotto viene utilizzato per gli autoconsumi dell'impianto, mentre la restante parte può essere utilizzata per la produzione di energia da cedere all'esterno.

In particolare, per quanto riguarda gli usi interni, una parte (dal 15 al 25% dell'energia prodotta), può essere utilizzata per il riscaldamento dei digestori ed, eventualmente, per coprire il fabbisogno di energia elettrica dell'impianto (cogenerazione di calore ed elettricità). L'utilizzo del biogas per il riscaldamento è variabile in funzione della stagione e del momento nella giornata; il riscaldamento è in genere attivo quando avviene il caricamento del digestore.

Il biogas in eccesso può essere valorizzato con diverse modalità, alcune delle quali particolarmente sviluppate. Di seguito vengono riportate le principali possibilità di utilizzo.

- Produzione di calore sotto forma d'acqua calda, vapore o aria calda, per riscaldamento, essiccazione e processi industriali (disidratazione percolati di discariche). Rendimento medio: 80-85%. Questa scelta comporta l'esistenza di un impiego locale (condomini per abitazione collettiva o terziaria, rete di teleriscaldamento, industrie).
- Produzione di elettricità, generalmente con motori a gas, eventualmente con turbine a vapore per gli impianti di più ampia capacità. Rendimento medio: 30-35%.
- Produzione combinata di calore e di elettricità (cogenerazione). Rendimento medio: 80- 85%, 50% per calore e 35% per elettricità.

Esistono anche altre filiere emergenti, come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), quali:

- produzione di carburante per veicoli;
- produzione di gas naturale per iniezione nella rete pubblica di trasporto e distribuzione;
- utilizzo in forni industriali come combustibile primario o ausiliario.

La soluzione più comunemente adottata è rappresentata dalla produzione combinata di calore e di elettricità.

Tra i vari sistemi utilizzabili per la cogenerazione, che si differenziano tra loro per il tipo di motore termico impiegato per la generazione di potenza meccanica e quindi elettrica, si ricordano: turbina a vapore; turbina a gas; motori alternativi a ciclo Diesel; motori alternativi a ciclo Otto.

Per quanto riguarda la scelta tecnica del sistema di cogenerazione possono valere le seguenti considerazioni. Le taglie degli impianti più frequentemente adottate, in termini di portata di trattamento dei rifiuti e di conseguenza per quanto riguarda le potenze, portano ad escludere l'utilizzo di impianti con turbine a vapore.

Anche le turbine a gas, per quanto riguarda i loro rendimenti elettrici, inferiori nella media di circa il 10% rispetto ai motori alternativi, non sembrano costituire la soluzione ottimale. Inoltre il loro utilizzo è stato fino ad oggi limitato dal fatto che non esistono sul mercato turbine di piccola capacità, in grado di accettare ampie variazioni di quantità e qualità del combustibile. La soluzione più conveniente consiste nella scelta di motori alternativi a ciclo Diesel ed a ciclo Otto.

Il biogas prodotto dal digestore deve essere utilizzato in continuo, pertanto il dimensionamento di tutte le apparecchiature deve essere fatto tenendo conto dei periodi di fermata necessari per l'esecuzione delle operazioni di manutenzione programmata.

Le apparecchiature in commercio garantiscono rendimenti di conversione dal 30 fino al 45% a

seconda della taglia del motore e del gas di alimentazione.

Al fine di ottenere una certa flessibilità, è consigliabile prevedere almeno due gruppi, pertanto la taglia unitaria dei motori scende a livelli in cui il rendimento prevedibile è compreso tra il 32 e il 36%. Per l'alternatore, un rendimento elettrico usuale è del 95%.

Il rendimento complessivo dei gruppi può essere considerato normale tra il 30 e il 34% ed è tanto maggiore quanto più grande è la taglia (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Sistemi di accumulo del biogas: Per rendere compatibili le cinetiche di produzione di biogas con quelle di utilizzo è necessario installare un sistema di accumulo.

Il volume e la pressione devono essere determinati in funzione di una valutazione costi-benefici, cercando una soluzione di compromesso tra il costo d'investimento e di gestione, principalmente dovuto alla compressione del biogas, ed il beneficio derivante dalla vendita dell'energia prodotta.

Per non arrivare a volumi e a costi troppo sostenuti, lo stoccaggio deve essere limitato alla quantità necessaria per ammortizzare le punte di produzione (per esempio volume uguale ad un'ora di produzione), e deve essere realizzato a bassa pressione.

Tutte le tubazioni ed i serbatoi di stoccaggio del biogas devono essere realizzati a perfetta tenuta, in modo da evitare possibili infiltrazioni d'aria che potrebbero dar luogo ad esplosioni dovute al suo carattere altamente infiammabile (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Torcia di sicurezza: Come sottolineato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), in tutti gli impianti con produzione di biogas è necessario prevedere la presenza di una torcia di emergenza che garantisca la combustione del biogas prodotto.

Il dimensionamento della torcia deve essere fatto in modo tale da consentire non solo la combustione della portata normale del biogas, ma anche dei quantitativi provenienti dall'eventuale svuotamento rapido di tutti gli stoccaggi.

La torcia di sicurezza deve consentire la combustione del biogas in condizioni di emergenza assicurando:

- il mantenimento di valori di temperatura adeguati a limitare l'emissione di inquinanti e la produzione di fuliggine;
- l'omogeneità della temperatura all'interno della camera di combustione;
- un adeguato tempo di residenza del biogas all'interno della camera di combustione;
- un sufficiente grado di miscelazione tra biogas ed aria di combustione;
- un valore sufficientemente elevato della concentrazione di ossigeno libero nei fumi effluenti.

Al fine di conferire al sistema una maggiore affidabilità la torcia deve essere dotata di sistemi automatici di accensione e controllo della fiamma. Il tempo di funzionamento deve essere calcolato tenendo conto dei tempi di manutenzione dei gruppi (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

2.3 La disidratazione dei fanghi

Durante la fase di digestione anaerobica la materia secca volatile si trasforma in biogas e quindi fuoriesce dal digestore, mentre nella massa rimane un fango, più liquido che all'ingresso, con valori di sostanza secca dell'ordine del 20-25% per i processi a secco e del 5-10% per i processi liquidi, costituito dalla materia non digerita e dalla maggior parte dell'acqua.

Tale fango deve essere sottoposto ad un trattamento di disidratazione, al fine di ottenere un prodotto più concentrato (circa 45% di materia secca), avente caratteristiche fisiche compatibili con la successiva fase di stabilizzazione aerobica (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

A seconda della qualità dei rifiuti trattati, del tipo di processo (secco, semi-secco o liquido) e del destino della materia stabilizzata, il sistema di disidratazione dei fanghi digeriti può essere realizzato mediante pressa a vite, centrifuga o nastropressa oppure mediante una opportuna combinazione di queste apparecchiature.

La scelta deve essere fatta in funzione della granulometria delle particelle dure, del tenore in materia secca del materiale da inviare alla stabilizzazione aerobica e del tenore in materia secca dell'acqua di processo in relazione con il suo destino.

In tabella 2.6 sono riportate le caratteristiche delle apparecchiature citate in termini di percentuale di materia secca ottenuta nelle due frazioni separate (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Tipo di macchina	% MS frazione secca	% MS frazione liquida
Pressa a vite	40-55%	10-20%
Centrifuga	25-35%	3-8%
Nastro-pressa	30-40%	1-3%

Tabella 2.6 Caratteristiche delle apparecchiature di disidratazione (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

Stabilizzazione e raffinazione del fango digerito: Come evidenziato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), il digestato in uscita dalla digestione anaerobica deve subire ulteriori processi di trasformazione grazie ai quali si ottiene un materiale opportunamente biostabilizzato e rispettoso dei limiti imposti dalla Direttiva Nitrati. Questo lo rende idoneo all'utilizzo come materiale di copertura quotidiana di discariche o come fertilizzante di qualità per i terreni agricoli.

Il fango digerito prodotto dalla fase di metanizzazione risulta infatti in genere non completamente stabilizzato, a causa del ridotto tempo di residenza dei rifiuti all'interno del reattore.

A tale scopo viene prevista una successiva fase di stabilizzazione aerobica, finalizzata al completamento della degradazione della materia organica, più difficilmente degradabile, ed all'ottenimento dell'igienizzazione del materiale. Il grado di maturazione richiesto dipende dall'utilizzo finale del prodotto stabilizzato.

Oltre a ciò, con particolare riguardo per la digestione anaerobica a secco di cui si dirà diffusamente in seguito, il riscaldamento che il materiale subisce per circa 4 settimane ad una temperatura di 38 °C è ben lontano da quello minimo di igienizzazione di 55 °C.

A tal proposito, attraverso una corretta gestione delle fasi del successivo processo aerobico di compostaggio e grazie al riscaldamento spontaneo della massa, è possibile raggiungere temperature che permettono l'igienizzazione del compost, eliminando germi patogeni, larve e uova di parassiti eventualmente presenti e inattivando i semi di piante infestanti.

Generalmente il fango digerito viene sottoposto ad un trattamento di stabilizzazione che si sviluppa in due fasi: *biossidazione accelerata* e *post-maturazione* (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002)).

Poiché il materiale organico ha già subito una parziale degradazione, i tempi di permanenza nel reparto di stabilizzazione aerobica potranno essere contenuti entro i 30-45 giorni.

A seconda del destino finale del biostabilizzato può essere richiesta una raffinazione del materiale, da realizzare dopo la fase di biossidazione accelerata o, in alternativa, dopo la postmaturazione.

Il compost stabilizzato, ottenuto dal trattamento aerobico del digestato, rappresenta un concime organico di qualità, ricco di composti elementari fertilizzanti e sali minerali, che può essere utilizzato in agricoltura o nel giardinaggio.

2.4 Stoccaggio finale dei prodotti e bilancio di massa dell'impianto

Come riportato dal GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002), negli impianti di digestione anaerobica dei rifiuti devono essere previsti reparti per lo stoccaggio differenziato del materiale trattato e dei residui del trattamento. Le zone di stoccaggio devono essere, preferibilmente, coperte per evitare possibili alterazioni e, specialmente nella stagione invernale, il dilavamento a causa delle frequenti precipitazioni.

Le dimensioni della sezione di stoccaggio finale e le distanze dai cumuli devono essere tali da garantire la circolazione ed il movimento degli automezzi adibiti alle operazioni di prelievo e scarico dei materiali stessi.

Il *bilancio di massa* permette di apprezzare l'evoluzione delle diverse frazioni liquide e solide che costituiscono il substrato nel corso del processo.

Il bilancio varia a seconda del tipo di processo (a secco o ad umido) ma è comunque strettamente correlato alla natura dei rifiuti trattati (rapporto tra rifiuti di cucina, rifiuti verdi, carta/cartone, rifiuti dell'industria agro-alimentare, ecc.), in cui il tenore di inerti, di materia secca e di materia organica degradabile è variabile.

Nelle figure seguenti sono riportati degli esempi indicativi di bilanci di materia validi per impianti di digestione anaerobica a secco e ad umido di rifiuti urbani e di rifiuti organici selezionati.

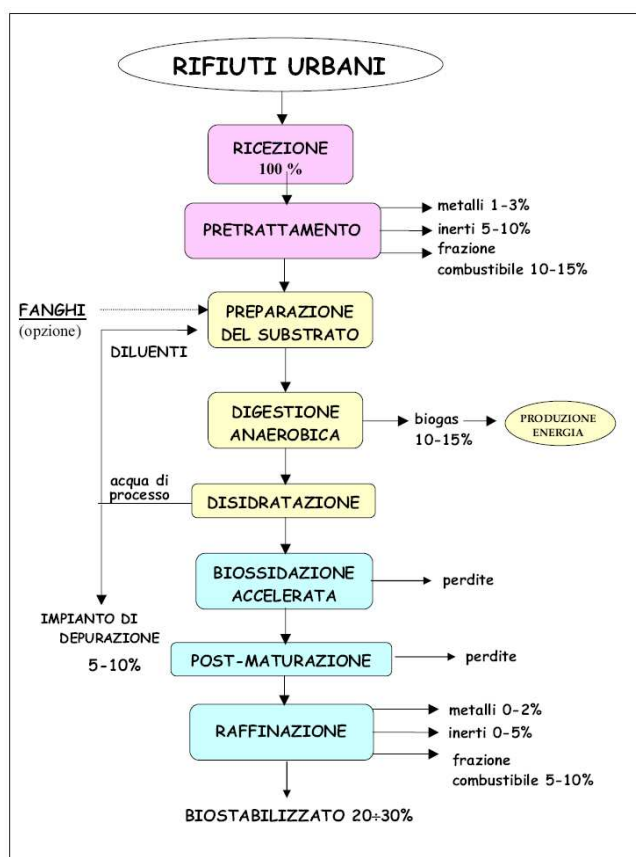


Figura 2.2: Bilancio di massa di un impianto per rifiuti urbani con processo a secco (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

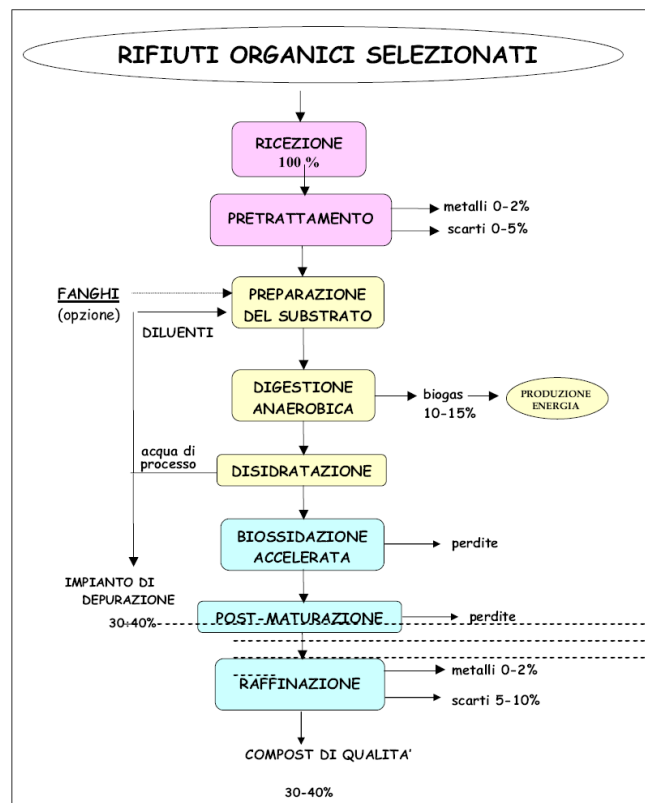


Figura 2.3 Bilancio di massa di un impianto per rifiuti organici selezionati con processo a secco (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

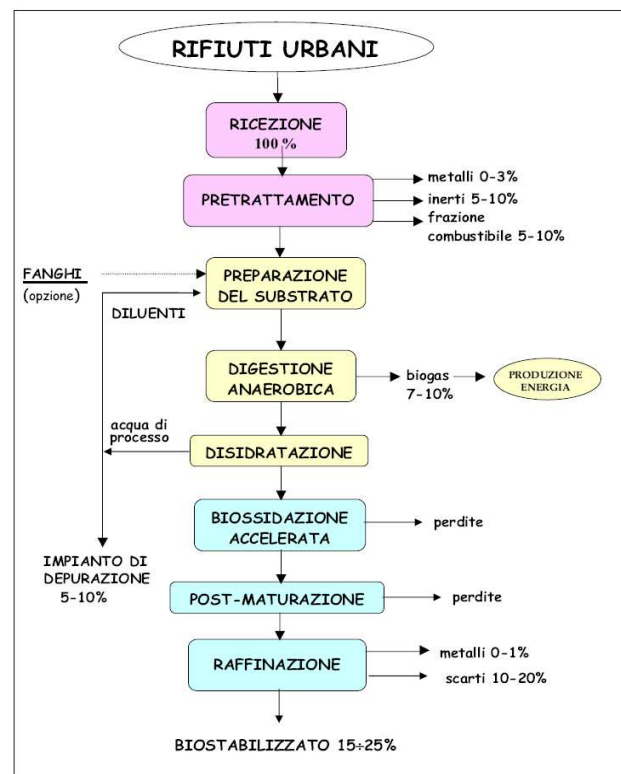


Figura 2.4 Bilancio di massa di un impianto per rifiuti urbani con processo liquido (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

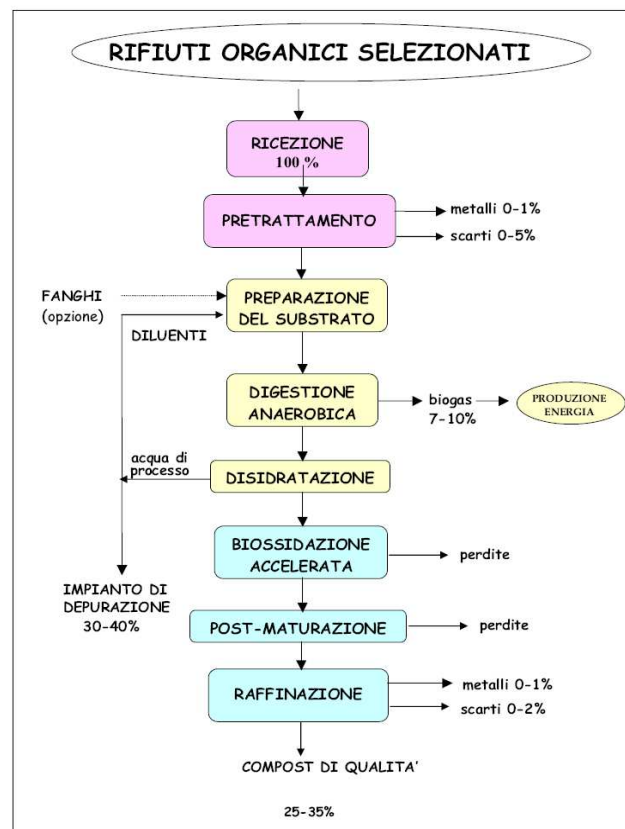


Figura 2.5 Bilancio di massa di un impianto per rifiuti organici selezionati con processo liquido (GDL Unità Normativa Tecnica ANPA (2002))

2.5 Il compostaggio

Il compostaggio, come descritto dal CRPA (2006), è un processo controllato di decomposizione e stabilizzazione della sostanza organica operato da microrganismi diversi (batteri e funghi) in presenza di ossigeno. In natura esistono esempi spontanei di processi di demolizione della sostanza organica; rispetto a questi, il compostaggio si differenzia per la maggiore velocità di svolgimento ed una notevole produzione di calore, in quanto, essendo controllato, si sviluppa in condizioni tali da ottimizzare l'azione demolitiva microbica (Figura 2.7).

Il processo evolve essenzialmente attraverso due fasi: la **fase termofila**, o fase attiva, e la **fase di maturazione**, o umificazione. Durante la fase di bio-ossidazione spinta (o fase attiva, o fase termofila), una flora batterica specifica attacca e demolisce le molecole organiche più facilmente degradabili (zuccheri, acidi organici, aminoacidi, ecc.); questo comporta un notevole consumo di ossigeno da un lato e dall'altro la produzione di anidride carbonica e di energia sotto forma calore. Tale calore porta la temperatura della massa in compostaggio sino a 60-70 °C, valori che persistono per tempi prolungati; ciò assicura la distruzione degli agenti patogeni e dei semi delle erbe infestanti eventualmente presenti. La durata di tale fase è correlata alla tipologia dei residui trattati e alla tecnologia produttiva adottata.

Successivamente (fase di maturazione o umificazione) la decomposizione procede con tempi più lunghi a carico delle molecole organiche più complesse e resistenti (lignina, cellulosa, ecc.) affiancata da processi di ricombinazione che portano alla sintesi di composti umici.

Il periodo di maturazione varia in funzione del tipo di prodotto desiderato; buoni risultati si ottengono già in 45-60 giorni circa (CRPA (2006)).

Il trattamento di stabilizzazione biologica mediante compostaggio viene applicato a matrici organiche di scarto di varia natura, come meglio descritto di seguito:

➤ *compostaggio di scarti organici selezionati alla fonte* sia di origine urbana che extra-urbana (FORSU, scarti vegetali della manutenzione del verde, fanghi di depurazione, scarti dell'industria agroalimentare, effluenti zootecnici palabili quali letami e/o frazioni solide di liquami).

L'obiettivo è quello di produrre ammendanti compostati di qualità che rispettano i requisiti per il libero impiego e la libera commercializzazione previsti dalla legge 748/84 e successivi decreti di modifica e integrazione;

➤ *stabilizzazione aerobica della frazione organica separata dai RU a valle della raccolta o di matrici selezionate ma ad alto carico di inquinanti*, con produzione di materiali stabilizzati da impiegare nella gestione ordinaria delle discariche per rifiuti urbani come materiale di copertura e/o da destinare all'uso controllato in attività di ripristino ambientale;

➤ *stabilizzazione del rifiuto urbano tal quale o del rifiuto secco residuo* (in zone con raccolte differenziate dell'umido spinte) finalizzata alla riduzione della fermentescibilità e del contenuto di umidità prima della collocazione in discarica in coerenza con quanto previsto dalla Direttiva 99/31 CE o prima dell'avvio a termovalorizzazione, per aumentare il potere calorifico.

Se si esaminano gli ambiti di applicazione del trattamento di compostaggio, si intuiscono facilmente quali siano i vantaggi che ne derivano, riassumibili nei seguenti punti:

➤ riduzione della fermentescibilità della sostanza organica, con produzione di un materiale stabile, cioè soggetto a trasformazioni biochimiche più lente. I materiali che ne risultano presentano quindi caratteristiche chimico-fisiche e biologiche tali da essere compatibili con l'ambiente finale cui sono destinati; quando si parla di compostaggio di qualità si arriva ad ottenere un vero e proprio prodotto da impiegare come mezzo di produzione in agricoltura.

Quando si parla di frazioni organiche meno nobili, si dispone comunque di un materiale che, anche se collocato in discarica, non genera più massicce produzioni di biogas e percolato ad alto carico inquinante;

➤ igienizzazione della massa con distruzione degli eventuali agenti patogeni per l'uomo e/o per le piante presenti negli scarti organici "freschi";

➤ riduzione significativa di peso e di volume, con conseguente ottimizzazione dei costi di trasporto e dei volumi occupati in caso di materiali destinati in discarica.

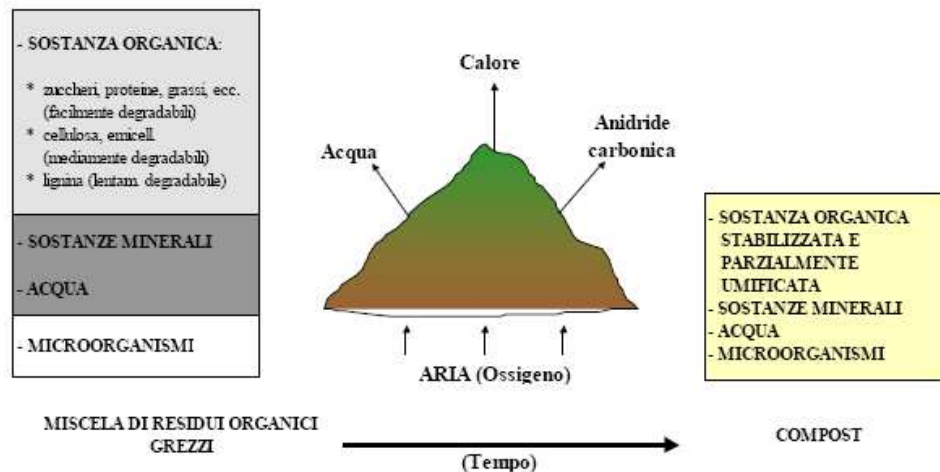


Figura 2.7 Schema del processo di compostaggio (CRPA (2006))

Un “sistema” di compostaggio è l’insieme di strutture, macchine e attrezzature in grado di effettuare l’intero ciclo di stabilizzazione di rifiuti organici.

Indipendentemente dalla tecnica adottata, il ciclo di trattamento in un impianto di compostaggio prevede una serie di operazioni riconducibili a quattro fasi (Figura 2.8):

1. *pretrattamenti* finalizzati alla preparazione della miscela di partenza;
2. fase di *degradazione biologica*, o fase bio-ossidativa, o fase attiva;
3. fase di *maturazione*: necessaria per completare la fase di trasformazione e stabilizzazione del prodotto, può essere attuata con sistemi più o meno semplici a seconda della tecnologia adottata nella fase precedente;
4. *raffinazione* e nobilitazione del prodotto: in questa fase sono comprese tutte le operazioni necessarie per ottenere un prodotto finito con caratteristiche qualitative costanti nel tempo e con i requisiti commerciali richiesti dal settore di destinazione.

Per lo svolgimento delle diverse operazioni che rientrano nella fase di pretrattamento, prima dell’avvio alla fase attiva, oppure di post-trattamento, cioè di raffinazione, sono necessarie varie tipologie di macchine e attrezzature, tutte ormai largamente rappresentate sul mercato nazionale con numerosi modelli.

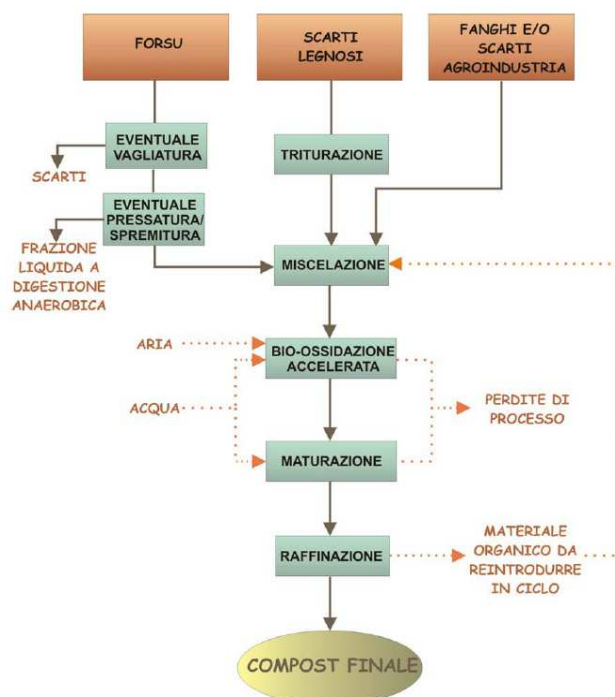


Figura 2.8 Schema di flusso del ciclo di compostaggio (CRPA (2006))

2.6 I sistemi integrati anaerobico-aerobico

Il fatto che, a fronte del consolidamento del ruolo del compostaggio aerobico, anche la digestione anaerobica stia ottenendo sempre maggiore attenzione tra le tecnologie per il trattamento dei rifiuti solidi organici, ha invogliato, in particolare in questi ultimi anni, sempre più i progettisti ad esaminare le possibili integrazioni dei due processi al fine di ottimizzarne i rispettivi pregi e minimizzarne gli svantaggi.

I principali vantaggi e svantaggi dei due processi possono essere così sintetizzati (CRPA (2006)):

- la digestione anaerobica produce energia rinnovabile (biogas) a fronte del compostaggio aerobico che consuma energia;
- gli impianti anaerobici sono in grado di trattare tutte le tipologie di rifiuti organici indipendentemente dalla loro umidità, a differenza del compostaggio che richiede un certo tenore di sostanza secca nella miscela di partenza;
- gli impianti anaerobici sono reattori chiusi e quindi non vi è rilascio di emissioni gassose maleodoranti in atmosfera, come può avvenire durante la prima fase termofila del compostaggio;
- nella digestione anaerobica si ha acqua di processo in eccesso che necessita di uno specifico trattamento, mentre nel compostaggio le eventuali acque di percolazione possono essere riciclate come agente umidificante sui cumuli in fase termofila;
- gli impianti di digestione anaerobica richiedono investimenti iniziali maggiori rispetto a quelli di compostaggio;
- la qualità del digestato, in uscita dalla digestione anaerobica, comporta un uso agronomico diverso rispetto al compost aerobico.

L'integrazione dei due processi può portare dei notevoli vantaggi, in particolare (CRPA (2006)):

- si migliora nettamente il bilancio energetico dell'impianto, in quanto nella fase anaerobica si ha la produzione di un surplus di energia rispetto al fabbisogno dell'intero impianto;
- si possono controllare meglio e con costi minori i problemi olfattivi; le fasi maggiormente odorigene sono gestite in reattore chiuso e le "arie esauste" sono rappresentate dal biogas (utilizzato e non immesso in atmosfera). Il digestato è già un materiale semi-stabilizzato e, quindi, il controllo degli impatti olfattivi durante il post-compostaggio aerobico risulta più agevole;
- si ha un minor impegno di superficie a parità di rifiuto trattato, pur tenendo conto delle superfici necessarie per il post-compostaggio aerobico, grazie alla maggior compattezza dell'impiantistica anaerobica;
- si riduce l'emissione di CO₂ in atmosfera; l'attenzione verso i trattamenti dei rifiuti a bassa emissione di gas serra è un fattore che assumerà sempre più importanza in futuro;
- il compostaggio "lega" meglio l'azoto del digestato, ed il compost è una buona fonte di N a lento rilascio, il che diminuisce la perdita di N in falda per lisciviazione ed in atmosfera come N₂O (altro potente gas serra);
- infine, il compostaggio del digestato consente di acquisire lo "status" legale e commerciale di prodotto (ai sensi della legge nazionale sui fertilizzanti).

Nella figura 2.9 si riporta, a titolo di esempio, un possibile schema di ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico di rifiuti organici di varia provenienza, urbana, agroindustriale, zootecnica (CRPA (2006)).

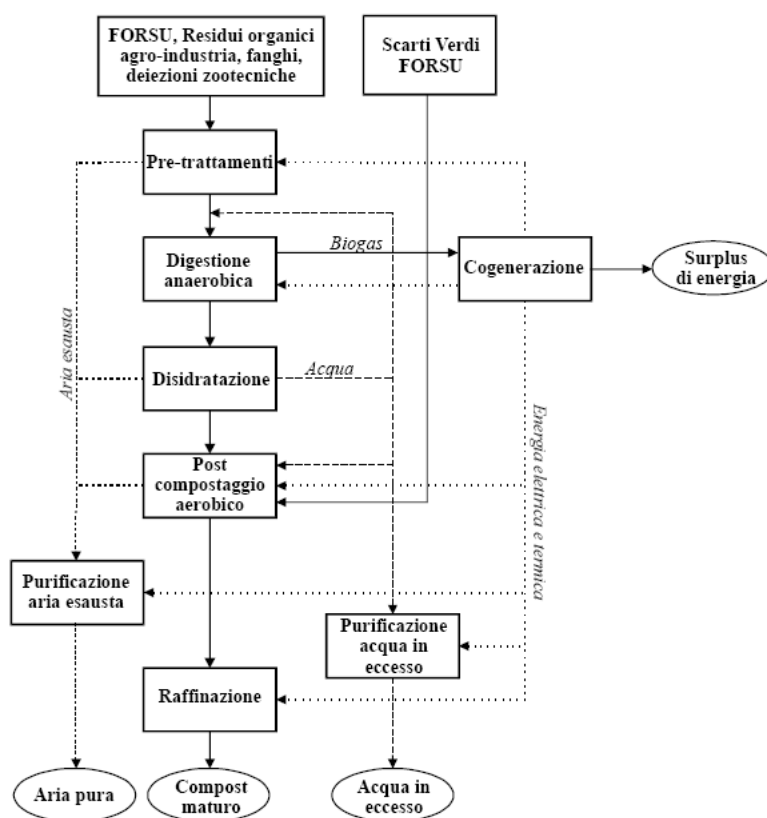


Figura 2.9 Schema del ciclo di trattamento integrato anaerobico/aerobico (CRPA (2006))

L'inserimento della digestione anaerobica, secondo lo schema di Figura 2.8, risulta interessante anche per tutti quegli impianti di compostaggio che, alla luce dell'incremento delle raccolte differenziate secco/umido e della disponibilità di scarti organici agroindustriali si trovano nella necessità di aumentare la loro capacità di trattamento. In tal caso occorre porre attenzione alla fase di pretrattamento della FORSU (CRPA (2006)).

Relativamente allo schema e bilancio di massa del sistema di trattamento integrato anaerobico/aerobico per il solo rifiuto organico da raccolta differenziata, in Figura 2.9 si riportano le elaborazioni ottenute dalla letteratura tecnica.

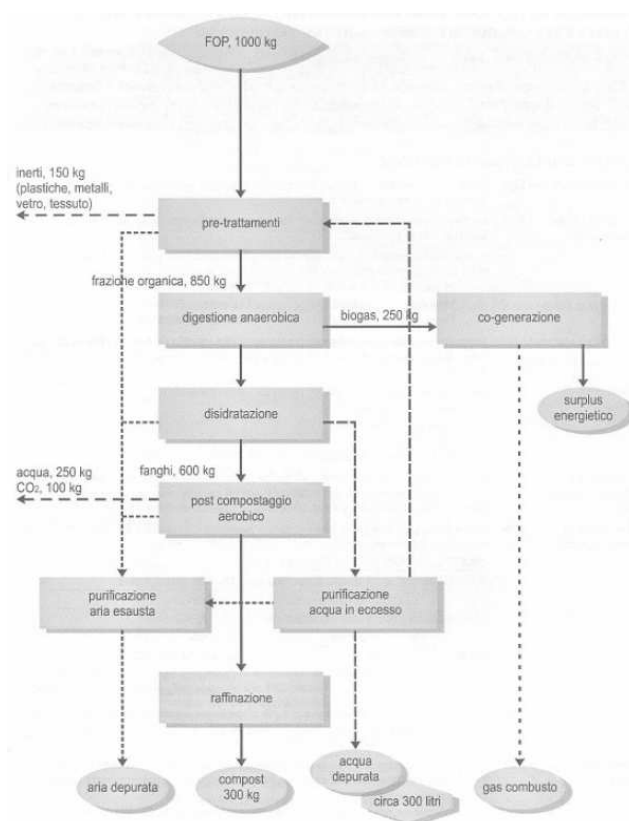


Figura 2.9 Schema e bilancio di massa del sistema di trattamento integrato anaerobico/aerobico per il solo rifiuto organico da raccolta differenziata (CRPA (2006))

2.6.1 I costi

I costi di investimento specifici di un impianto completo di digestione anaerobica dotato della sezione di pretrattamento e selezione dei rifiuti, dei reattori di digestione anaerobica, della sezione di cogenerazione con produzione di energia elettrica, della fase di maturazione aerobica (compostaggio) del digestato congiuntamente al necessario materiale lignocellulosico con funzione di strutturante e corredato dall'impianto di depurazione dei reflui di processo prodotti durante la digestione, si aggirano tipicamente su valori di 400-800 €/ton/anno, dove per (ton/anno) si intende la potenzialità annua unitaria dell'intero sistema di trattamento (a titolo di comparazione, si possono indicare costi unitari di investimento del solo compostaggio nell'intervallo 200-500 €/ton/anno)).

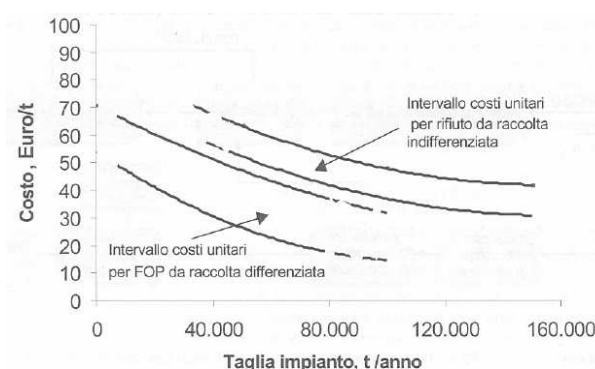
Le economie di scala hanno una forte influenza sui costi di investimento e i valori più bassi si ottengono su impianti di grandi dimensioni tipicamente con potenzialità maggiori di 50-70.000 ton/anno.

Fondamentale importanza hanno, nel conto economico d'esercizio dell'impianto, i Certificati Verdi che attualmente (2008) vengono quotati a circa 70-80 €/MWh contro i 120 €/MWh della prima parte del 2007. Tale valore deve essere sommato, solo per la quota di energia che viene ceduta all'esterno e quindi al netto degli autoconsumi, al prezzo di cessione dell'energia al gestore della rete che attualmente si attesta attorno ai 70-75 €/MWh anche questo in calo rispetto al 2007.

I certificati verdi sono riconosciuti sull'intera produzione di energia rinnovabile per un periodo di 15 anni dalla messa in esercizio dell'impianto.

Tuttavia il valore dei Certificati Verdi è soggetto a fluttuazioni che certamente non contribuiscono a garantire tempi di ritorno certi dell'investimento, se non a scapito del prezzo unitario (€/ton) di conferimento dei rifiuti che vengono trattati. Le ragioni del crollo di valore dei CV e del numero di CV trattati sono diverse; tra queste, sicuramente, l'opportunità offerta alle società elettriche di coprire la quota d'obbligo di energia da fonti rinnovabili da immettere sul mercato (art.11 D.lgs. 79/99, Decreto Bersani) con energia rinnovabile importata; problema nel problema è il fatto che non sempre c'è trasparenza circa l'effettiva origine da fonte rinnovabile di tale energia.

Relativamente ai costi di investimento e di gestione del sistema integrato anaerobico/aerobico nella Figura 2.10, tratta da CRPA (2006), l'andamento del costo specifico di trattamento per tonnellata di rifiuto organico da raccolta differenziata e di rifiuto indifferenziato al variare della taglia dell'impianto.



NOTA: L'analisi dei costi qui rappresentata è determinata sulla base di una filiera di trattamento che prevede le seguenti sezioni: linea di pre-trattamento dei rifiuti conferiti, sezione di digestione anaerobica a fase unica, post trattamenti di disidratazione, stadio di post-compostaggio dei fanghi ispessiti effluenti dal digestore. Vengono inoltre considerate le seguenti voci di costo: costi di investimento (ammortamento in 12 anni al 4% di interesse); costi di gestione (personale, manutenzione impianto, consumi, smaltimento residui); recupero economico derivante dall'utilizzo del biogas prodotto (tariffa da 50 a 150 Euro/MWh); sia per rifiuto differenziato che indifferenziato, per diverse capacità di trattamento (da 10.000 fino a 150.000 t/anno). Non sono invece contemplati nel bilancio i costi di raccolta e trasporto dei rifiuti.

Figura 2.10 Andamento del costo specifico di trattamento per tonnellata di rifiuto organico da raccolta differenziata e di rifiuto indifferenziato al variare della taglia dell'impianto (CRPA (2006))

2.7 La progettazione degli impianti di digestione anaerobica dei rifiuti

Lo sviluppo di un progetto per la realizzazione di un impianto di digestione anaerobica inizia con la formulazione della proposta progettuale. Questa descrizione di base viene successivamente sviluppata in dettaglio per avere conferma della possibilità tecnica, economica e legale di realizzazione del progetto.

Se viene confermata la fattibilità dell'impianto vengono intraprese tutte quelle azioni necessarie alla realizzazione dell'istallazione (preparazione del progetto). A questo punto, il digestore anaerobico può essere effettivamente realizzato.

A causa della sua complessità, il successo economico di un impianto di digestione anaerobica dipende da diversi parametri.

Alcuni di questi dipendono dai governi, come il prezzo di acquisto per l'energia prodotta utilizzando biogas ed eventuali sussidi; altri dall'azienda agricola e dal progetto, la quantità e la composizione della deiezione animale utilizzabile, la disponibilità di altro materiale organico digeribile, il consumo ed il costo dell'elettricità utilizzata dall'azienda agricola, la richiesta di calore da parte dell'azienda, l'uso finale del compost, la situazione finanziaria.

L'obiettivo principale nella progettazione di un impianto di digestione anaerobica è quello di massimizzare la produzione di biogas; questo può essere fatto aumentando la percentuale di sostanza secca del substrato. Nei moderni sistemi di digestione anaerobica può arrivare fino al 20% del substrato totale.

Una elevata percentuale di materia secca fa però aumentare le forze necessarie a miscelare il substrato e lo spessore delle pareti del digestore. I costi di investimento risultano più elevati, ma con costi di funzionamento più contenuti.

Inoltre i residui dell'industria agro-alimentare presentano un maggior rendimento di conversione in biogas rispetto alla deiezione animale. Nella maggior parte dei casi questi possono essere ottenuti a costi relativamente bassi. È dunque possibile valutare l'acquisto di queste sostanze da immettere considerandone però il costo ed il tipo di contratto, il tempo di approvvigionamento, l'utilizzo del compost in uscita dal processo.

Nella maggior parte dei casi, è economicamente conveniente immettere l'elettricità prodotta in rete. Tuttavia nelle ore di picco può essere conveniente l'utilizzo diretto dell'elettricità prodotta, mentre in altri casi può essere conveniente avere un'unità di cogenerazione tale da produrre elettricità soltanto nelle ore di picco. Questa decisione dovrebbe essere presa sulla base delle tariffe elettriche nelle varie ore della giornata e dei costi aggiuntivi necessari per installare un'unità cogenerativa più grande.

Al fine di immettere l'energia elettrica prodotta in rete, nella fase iniziale del progetto è sufficiente conoscere la potenza che può essere immessa in rete in modo da scegliere, opportunamente, l'unità di cogenerazione. Tutte le informazioni relative al collegamento alla rete devono essere richieste al gestore della rete.

Per quanto riguarda l'utilizzo del calore, bisogna tener conto della richiesta e del suo andamento temporale. Per esempio, per un utenza familiare la richiesta nel periodo estivo è notevolmente inferiore rispetto a quella del periodo invernale, è dunque opportuno trovare un compromesso tra i vantaggi ottenibili e i costi di impianto.

3. Descrizione impianto di digestione anaerobica ad umido

In questo capitolo si intende analizzare il progetto definitivo di un impianto di compostaggio con digestore anaerobico ad umido integrato, da realizzare in agro di Molfetta alla C.da Torre di Pettine.

Il progetto è stato realizzato dalla Società di Ingegneria “Ingegneria e Servizi”, per conto della società “COPARM s.r.l.”, nell’ambito di una gara di progettazione per l’appalto della progettazione esecutiva e della costruzione dell’impianto di compostaggio con digestore anaerobico suddetta.

Quest’ultimo è posto alla base del presente lavoro di tesi al fine di poter sviluppare una comparazione con il possibile impiego di una tecnologia a secco, ed evidenziare in tal modo le criticità e le migliorie apportabili, nonché i possibili risparmi e investimenti utili all’ottimizzazione in termini di rese complessive dell’impianto.

Tale comparazione verrà sviluppata sulla base dei seguenti aspetti fondamentali:

- ***Tecnologie e producibilità energetica***
- ***Impatti sull’ambiente e sicurezza***
- ***Gestione e manutenzione***
- ***Piano economico finanziario, computo metrico estimativo e business plan***

Saranno quindi sviluppate in maniera più approfondita le scelte progettuali sulle quali si pensa di poter intervenire attivamente con una tecnologia basata sulla digestione anaerobica a secco della FORSU a disposizione.

Le descrizioni, le scelte progettuali, i dimensionamenti e i riferimenti bibliografici seguiti e riportati di seguito derivano dalla rielaborazione del progetto realizzato dalla Società di Ingegneria “Ingegneria e Servizi” (2012).

3.1 Tecnologie e producibilità energetica

3.1.1 Descrizione generale del progetto

Il primo aspetto fondamentale dell’impianto in questione riguarda la portata di rifiuti in ingresso e la relativa provenienza. L’attuale previsione è orientata al trattamento della frazione organica putrescibile proveniente da raccolta differenziata, con una portata a regime di 80 t/g, valore che viene inizialmente raggiunto anche mediante l’utilizzo di scarti organici provenienti dal comparto agricolo o agro alimentare.

La portata di almeno 80 t/g di frazione organica putrescibile viene dunque garantita dalla possibilità di trattare la frazione organica separata, mediante selezione meccanica, dai rifiuti differenziati dei Comuni che hanno in corso procedure di aggregazione (Corato, Molfetta, Ruvo e Terlizzi).

Un secondo aspetto di pari importanza riguarda l’impiego delle tecnologie più avanzate, in grado di contenere i costi di trattamento a carico dei Comuni conferenti.

Sotto questo profilo, si è ritenuto di dover prevedere l’abbinamento di una prima fase di digestione anaerobica della FORSU ad una fase di maturazione aerobica dei residui del trattamento (“compostaggio” del fango in uscita dal fermentatore).

Tale scelta è stata dettata dalla necessità di rendere operativa e funzionante la sezione di compostaggio prevista a monte della progettazione dell'impianto di digestione anaerobica.

I vantaggi correlati a questa scelta sono diversi:

- l'emergere di un ricavo certo e consistente per la vendita di energia;
- il contenimento dei costi di gestione, derivante da una spinta "meccanizzazione" della "prima fase" (la "digestione", che sostituisce la "fase ACT" del compostaggio tradizionale);
- la possibilità di sfruttare in modo ottimale le strutture e gli spazi esistenti, economizzando al massimo anche l'impiego delle aree scoperte.

Su queste basi si è dimensionato il trattamento di digestione anaerobica sulla portata suddetta di 80 t/g. Con più specifico riferimento ai luoghi oggetto dell'intervento, ossia l'area attualmente dismessa da anni dell'impianto di compostaggio di Molfetta, ed alle opere da realizzarsi è stato previsto di suddividere l'intera realizzazione in due lotti funzionali:

- il primo prevede la realizzazione di tutte le opere "comuni" ai due lotti (ad esempio: ripristino della palazzina uffici, dell'impianto di pesatura, dell'impianto elettrico e di quello antincendio, ecc.), e di quelle necessarie per assicurare la "lavorazione" di una portata di rifiuti organici, provenienti da raccolta differenziata, variabile tra 40 ed 80 t/g;
- il secondo prevede l'allestimento di ulteriori aree di ricezione di rifiuti, necessarie per prevenire eventuali "sovraccarichi" della zona di ricezione inizialmente predisposta e per assicurare la selezione meccanica dei rifiuti residuali da raccolta differenziata.

Sotto il profilo operativo si prevede di ricevere ed avviare al processo di "digestione anaerobica – compostaggio aerobico" due flussi di rifiuti:

- da raccolta differenziata "di qualità" (rifiuti dei mercati, degli esercizi ortofrutticoli, di eventuali aziende agricole o agroalimentari, ecc.), con una presenza di sovralli non superiore al 5% in peso;
- da raccolta differenziata "ordinaria" e/o "domestica", con una presenza di sovralli che deve prevedersi compresa tra il 5 ed il 25% in peso.

L'applicazione della digestione anaerobica al trattamento dei rifiuti consente sia di conseguire un notevole recupero energetico, attraverso l'utilizzo del biogas prodotto, sia di produrre, attraverso il trattamento aerobico del fango digerito, un residuo stabilizzato impiegabile come ammendante organico in agricoltura o per ripristini ambientali.

L'aspetto del recupero energetico è senza dubbio quello più interessante, in quanto il biogas prodotto, costituito per la maggior parte da metano (circa il 50-60%), ha un elevato potere calorifico (4000-5000 kcal/Nm³) e pertanto può essere convenientemente convertito in cogenerazione (produzione congiunta di elettricità e calore).

Le applicazioni più frequenti prevedono la sua combustione in motori endotermici, che consente la produzione di energia elettrica e termica in quantità sensibilmente superiore agli autoconsumi dell'impianto, utilizzando apparecchiature dotate di elevata semplicità impiantistica e gestionale.

Nei paragrafi successivi verranno illustrate le caratteristiche della fase di digestione anaerobica dei rifiuti; verranno descritte, negli aspetti progettuali e gestionali, le principali operazioni unitarie che costituiscono il processo e le apparecchiature utilizzate. Si illustreranno le possibilità di utilizzo o di smaltimento dei prodotti e dei residui originati dal ciclo di trattamento e le modalità con cui verrà utilizzato il biogas prodotto dalla metanizzazione dei rifiuti. Verranno, inoltre, fornite indicazioni sul dimensionamento della linea di trattamento e presentati bilanci di massa ed energia, sottolineando le particolarità relative alla digestione ad umido.

3.1.2 Aspetti progettuali

Un impianto di digestione anaerobica e post-digestione aerobica della frazione organica dei rifiuti urbani può essere schematicamente suddiviso nei seguenti reparti:

- ricezione
- pretrattamento
- preparazione substrato
- digestione anaerobica
- produzione di energia
- disidratazione
- bioossidazione accelerata
- post-maturazione

I rifiuti in ingresso all'impianto vengono trasferiti dai mezzi di raccolta al reparto ricezione, nel quale vengono stoccati all'interno di una fossa interrata oppure su un piazzale di scarico a raso.

Dal reparto ricezione i rifiuti sono alimentati al reparto pretrattamento, nel quale vengono sottoposti ad una serie di operazioni atte a consentire l'eliminazione delle componenti indesiderate per la successiva fase di digestione anaerobica, quali ad esempio inerti e plastiche.

I rifiuti così pretrattati sono avviati al reparto preparazione del substrato dove subiscono un'omogeneizzazione, viene regolato il loro contenuto di umidità attraverso miscelazione con acqua di ricircolo e successivamente viene eseguita una correzione della temperatura, in modo da ottenere una miscela con caratteristiche chimico-fisiche ottimali per poter essere alimentata nei digestori.

Il reparto di digestione anaerobica è costituito da un digestore in cui avviene, in condizioni controllate, la degradazione della sostanza organica e la produzione di biogas. Il biogas prodotto, contenente circa il 50-60% di metano, viene depurato e avviato al reparto di produzione di energia (elettrica e termica), che è in parte utilizzata per gli autoconsumi dell'impianto ed in parte commercializzata all'esterno.

Il fango digerito viene estratto dalle unità di digestione anaerobica ed inviato al reparto di disidratazione dal quale si ottiene una corrente di fanghi a basso contenuto di umidità ed una corrente di reflui di processo.

Questi ultimi verranno in parte riciclati al reparto di preparazione del substrato e per la restante parte avviati ad una fase di depurazione mediante trattamento chimico - fisico.

Il fango digerito e disidratato è invece avviato alla sezione di stabilizzazione aerobica, che si compone di una prima fase di bioossidazione accelerata e di una successiva post-maturazione.

Il prodotto ottenuto è avviato al reparto di raffinazione per l'eliminazione di quelle impurità che potrebbero comprometterne il successivo utilizzo.

Nei punti successivi verranno descritti con maggior dettaglio i vari reparti dell'impianto.

3.1.3 Operazioni di pretrattamento

I mezzi di trasporto che conferiscono i rifiuti in impianto, dopo il controllo della regolarità della documentazione d'accompagnamento e la verifica della loro qualità, vengono inviati alla registrazione per mezzo del sistema di pesatura. Al termine delle operazioni di riconoscimento e pesatura in ingresso, i mezzi scaricano nell'area adibita ad accumulo, ovvero un capannone dimensionato per poter accogliere quantità di rifiuti corrispondenti ad almeno 3 giorni di conferimento.

Un incaricato dell'impianto sorveglia le operazioni di scarico e, successivamente, i rifiuti sono prelevati con una pala gommata e avviati alla fase di pretrattamento meccanico.

Al fine di evitare la diffusione di odori verso l'esterno è previsto un impianto d'aspirazione e di trattamento dell'aria, per una portata equivalente a circa 3 ricambi/ora, che mantiene in depressione il fabbricato. L'aria aspirata viene trattata con abbattitori scrubber e biofiltro, per il controllo delle emissioni odorigene, prima del rilascio in atmosfera.

E' prevista inoltre l'installazione di un sistema di lavaggio dei mezzi gommati al fine di ridurre lo spandimento di materiali inquinanti nella rete viaria dell'impianto.

Le operazioni preliminari cui vengono sottoposti i rifiuti sono essenzialmente rivolte alla predisposizione della miscela per le fasi di reazioni biologiche (precarica e digestore), e specificatamente:

- **Triturazione**, mirata alla completa apertura di tutti i contenitori e ad una riduzione in pezzatura congruente con le successive fasi;
- **Vagliatura**, mirata alla separazione della frazione umida (sottovaglio) dalle frazioni indesiderate (sopravaglio);
- **Spremitura**, mirata alla selezione della frazione umida, riducendola ad una purea pompabile, dalla rimanente frazione secca di piccola dimensione, ancora presente, e non altamente putrescibile, e dalle plastiche.

I rifiuti prelevati con la pala gommata dalla sezione di ricezione e stoccaggio sono caricati nel trituratore aprisacchi, dotato di un'ampia tramoggia di carico, per essere liberati dai sacchi che lo contengono e subire un'idonea frantumazione che non sia deleteria per le successive fasi di reazione biologica.

Il materiale, una volta triturato, cade sul sottostante trasportatore a piastre metalliche rivestito in gomma, che provvede ad alimentare il vaglio rotante ove avviene la separazione della frazione umida (sottovaglio) dalla frazione secca (sopravaglio).

Il processo di vagliatura genera quindi due flussi denominati:

- il flusso sottovaglio, composto in prevalenza da parti aventi granulometria inferiore ai fori esistenti sulla rete vagliante, intercettato dal trasportatore in gomma di raccolta sottovaglio;
- il flusso sopravaglio, composto dalla rimanente parte avente granulometria superiore ai fori esistenti sulla rete vagliante, intercettato dal trasportatore in gomma di uscita sopravaglio.

La frazione umida intercettata dai trasportatori di raccolta sottovaglio viene trasferita alle sprematrici, mentre la frazione secca intercettata dal trasportatore di uscita sopravaglio è scaricata in un cassone scarrabile che viene successivamente allontanato dall'impianto, in quanto non compatibile con il processo.

La frazione umida, opportunamente trasferita alle sprematrici, è sottoposta ad un ulteriore processo di separazione, in quanto contenente ancora residue quantità di frazione solida costituita da plastiche. Il processo di separazione genera quindi due prodotti:

- il prodotto liquido privo di corpi di plastica, che sarà raccolto e convogliato al di sotto della macchina per essere trasferito a mezzo di idonee coclee alle vasche di precarica per la prima fase delle reazioni biologiche;
- il prodotto solido privo di sostanza organica, che sarà espulso verso l'alto della macchina dall'apposita apertura realizzata sulla sommità del lato posteriore della macchina stessa, per essere convogliato tramite trasportatori in un cassone scarrabile che successivamente sarà allontanato dall'impianto.

La sprematrice è stata concepita per separare in generale la sostanza organica da quella inorganica. Quest'ultima trova campo di applicazione nel trattamento dell'umido da raccolta differenziata, separando fisicamente eventuali materiali non organici presenti nella FORSU (plastica, sassi, ecc.).

Nella lavorazione del FORSU è possibile anche apportare liquidi esterni quali acqua, liquami e/o percolati controllati, digestato ecc... (in un rapporto direttamente proporzionale alla qualità e umidità della matrice in ingresso) al fine di diluire la percentuale di sostanza secca che si trova nel flusso di materiale fluido separato.

I materiali che si ottengono con l'impiego della macchina sono:

1. La ***purea***: che rappresenta come minimo circa il 90% del materiale fresco trattato e viene destinata alla digestione anaerobica per la produzione di biogas; la purea avviata al processo di digestione anaerobica rappresenta un materiale di elevata qualità e di caratteristiche congeniali per il trattamento essendo priva di plastiche e residui di piccola dimensione, come vetro e inerti.
2. Il ***secco***: composto da materiale fibroso, plastiche e inerti che viene destinato allo scarto.

3.1.4 Dimensionamento della fase di digestione anaerobica

Il rifiuto in uscita dalla fase di pretrattamento sarà avviato alla successiva fase di digestione anaerobica tramite un sistema costituito dalle seguenti sezioni:

- coclea di trasporto del materiale in uscita;
- vasca di accumulo intermedia per agevolare il sistema di alimentazione alle vasche di precarica del materiale in uscita dal pretrattamento;
- due vasche di precarica poste in parallelo, alimentate dal materiale in arrivo dalla fase precedente e dalle acque di processo;
- un digestore anaerobico atto allo svolgimento delle reazioni di fermentazione del substrato.

Si prevede l'utilizzo di due vasche di precarica, ciascuna di volume pari a 500 m^3 , per un totale di 1.000 m^3 complessivi, nelle quali si innescano le prime fasi delle reazioni anaerobiche (idrolisi ed acidificazione).

Le vasche di precarica saranno realizzate fuori terra ed hanno ciascuna un'area di $10 \times 8,4 \text{ m}$ ed un'altezza di 6 m .

Queste vasche sono dotate di "agitatori meccanici" per la movimentazione del materiale in ingresso, a differenza del digestore, dove motivi di carattere economico e tecnico hanno spinto verso la scelta di installare un sistema di diffusori di biogas.

Le vasche di precarica permettono un comodo monitoraggio dell'alimentazione, permettendo di intervenire in caso di eventuali problemi, prima dell'introduzione nel fermentatore metanogenico, per il quale si cercano di ridurre le operazioni di manutenzione. Inoltre permettono di effettuare aggiunte, scaldare il materiale, estrarre sabbie e inerti eventualmente presenti nel materiale in ingresso.

La realizzazione di due vasche consente inoltre di averne costantemente una "in fermentazione" ed una "in riempimento". Sono agevolmente ispezionabili, senza rischi per gli operatori, alla fine di ogni ciclo che dura orientativamente 14-16 ore. Contengono inoltre dispositivi (agitatori) ed una quantità d'acqua sufficiente a portare la "purea" a condizioni di adeguata omogeneità, tali che la stessa può poi essere avviata al fermentatore primario.

Il substrato all'interno del digestore viene mantenuto ad una temperatura costante di 35° , che permette l'instaurarsi di un regime mesofilo per le reazioni di fermentazione.

Per il riscaldamento del substrato in ingresso viene sfruttato il calore prodotto in cogenerazione per il riscaldamento delle vasche di precarica, utilizzando una serpentina attraverso la quale passa il fluido termovettore proveniente dai motori.

Il digestore è un reattore in cui viene inserito il materiale organico da sottoporre a trasformazione. Dal punto di vista costruttivo, è realizzato da una struttura cilindrica in cemento coibentata esternamente e nella parte superiore è presente una campana gasometrica a doppia membrana che permette l'accumulo del biogas.

Il carico del materiale nel digestore è effettuato con continuità durante il periodo di funzionamento e le varianti sono costantemente monitorate e controllate, impedendo che si raggiungano eccessive concentrazioni di nutrienti. Nel caso della FORSU l'alimentazione risulta molto vicina alle condizioni ottimali: anche se varia stagionalmente, si mantiene sempre appropriata e le variazioni sono diluite nel tempo.

La geometria è legata ad altri fattori oltre che alla dispersione termica o, entro certi parametri come visto precedentemente, all'agitazione. La dispersione termica è ovviabile tramite la coibentazione esterna.

Inoltre il progetto prevede un'altezza del reattore non eccessiva, poiché si adotta un sistema di movimentazione tramite gas lifter, con conseguente necessità di ricircolare il biogas ad una pressione sufficiente, legata all'altezza idraulica all'interno della vasca; la spesa di energia per la compressione del gas aumenta infatti in maniera rilevante con l'altezza del bagno.

Il biogas viene mantenuto in leggera pressione (1,02 – 1,04 bar) in modo che, in caso di imperfetta tenuta della copertura, non si abbia introduzione di aria dall'esterno e formazione di miscele esplosive $\text{CH}_4 - \text{O}_2$.

Il processo di digestione anaerobica presenta le seguenti caratteristiche:

- considerata la procedura di alimentazione, si tratta di un *digestore ad alimentazione continua*;
- in base al regime idraulico del reattore si tratta di un CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), ossia di *reattore completamente miscelato*;
- in base alla sequenza delle reazioni si tratta di un *reattore a fasi riunite*, anche se parte delle reazioni iniziali si avvieranno all'interno delle vasche di precarica;
- in base alla temperatura di digestione e la quantità di solidi volatili alimentati, viene mantenuto un *regime mesofilo*;
- in funzione del tenore di secco nella biomassa di alimentazione, il *processo è ad umido*.

Il dimensionamento di un digestore per il trattamento della frazione organica selezionata è stato condotto secondo le indicazioni riportate dal GDL APAT (2005) in "Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi", ossia considerando il carico volumetrico alimentato giornalmente (l'unico parametro da considerare in questo caso è il tempo di ritenzione idraulico).

In tabella 3.1 sono riportati i valori di HRT nelle varie condizioni di processo e per diversi substrati in alimentazione.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	14-30	15-20	17-30	10-18	6-15	12-20
Frazione organica da raccolta differenziata o selezionata alla fonte	12-18	12-18	17-25	8-16	10-16	12-16

Tabella 3.1 Valori del tempo di residenza volumetrica (HRT [d]) nei vari processi (APAT GDL (2005))

Nel caso in esame si tratta di un processo a umido in regime termico mesofilo; dunque viene considerato un valore prudenziale pari a: $HRT = 18 \text{ g}$.

Viene adottata una procedura di calcolo riassumibile nei seguenti punti (APAT GDL (2005)):

1° fase – Determinazione dei flussi di massa in ingresso

Normalmente, nelle ipotesi di dimensionamento, è noto il bacino di utenza da servire. Si stima allora, sulla base dei dati a disposizione relativi allo stato della produzione rifiuti della zona e dalle raccolte, una produzione pro capite, espressa in g di frazione organica selezionata prodotta per AE per giorno.

Il flusso di massa in ingresso, inteso come rifiuti tal quale, sarà:

$$\text{Portata pro capite} \times \text{bacino di utenza} = \text{frazione organica selezionata al giorno}$$

Nel nostro caso si prevede un afflusso a regime di 80 t/g di FORSU; il valore da considerare deve tener conto dei trattamenti preliminari del rifiuto conferito all'impianto, per cui si considera un valore di 70 t/g di rifiuto selezionato e mondato dei sovralli.

Per definire le caratteristiche del flusso di alimentazione, vanno considerate le caratteristiche tipiche dei rifiuti organici da raccolta differenziata, viste in precedenza e riportate di seguito:

Parametro	Intervallo	Valore tipico
Umidità, %	72,6 - 79,6	74,4
Sostanza solida Totale (TS), %	21,4 - 27,4	25,6
Sostanza solida Totale Volatile (TVS), % TS	91,3 - 99,7	96,5
Sostanza Organica (TCOD), gCOD/gTS	1,1 - 1,3	1,2
Azoto (TKN), % TS	2,6 - 3,7	3,2
Fosforo Totale, % TS	0,13 - 0,28	0,2

Tabella 3.2 Caratteristiche tipiche della FORSU

Per il dimensionamento del digestore si considerano i valori tipici dei vari parametri:

$$\text{Tenore di umidità} = 74,4\%$$

$$\text{Sostanza solida Totale (TS)} = 25,6\% \text{ del quantitativo in ingresso}$$

$$\text{Sostanza solida Totale Volatile (TVS)} = 96,5 \% \text{ TS}$$

Il flusso in ingresso, che definisce il carico organico complessivo da inviare giornalmente al digestore, in termini di TS e TVS, viene calcolato nel seguente modo:

$$\text{frazione organica selezionata al giorno} \times \%TS = \text{TS al giorno} = 17920 \text{ kg}$$

$$\text{TS al giorno} \times \text{TVS}/\text{TS} = \text{TVS al giorno} = 17293 \text{ kg}$$

Per il calcolo del volume di acqua di processo che viene aggiunta in fase di miscelazione per garantire il funzionamento del processo di digestione ad umido, occorre tenere presente che è necessario passare dal valore iniziale del tenore di umidità della FORSU (74,4%) ad un valore finale del 92% di umidità:

$$\text{Portata di umidità iniziale} = 70000 \text{ kg/g} \cdot 0,744 = 52080 \text{ kg/g}$$

$$\text{Portata d'acqua da additivare} = x \text{ kg/g}$$

$$x + 52080 = 0,92 \cdot (70000 + x) \text{ da cui si ricava } x = 154000 \text{ kg/g}$$

La portata necessaria per garantire la diluizione viene fornita quasi per intero dal ricircolo delle acque di processo provenienti dalle successive fasi di disidratazione del digestato e depurazione delle acque di ricircolo e delle acque di pioggia.

Le acque provenienti dalla centrifuga di disidratazione vengono inviate direttamente nelle vasche di precarica, mentre le acque provenienti dalle vasche di raccolta a valle dell'impianto di depurazione vengono utilizzate per l'irrigazione della biomassa filtrante (biofiltri) e per alimentare l'impianto di spremitura (pretrattamento). All'interno delle spremitrici, il materiale passa dal valore iniziale di umidità del 74,4% ad un valore dell'85%; il tenore di umidità finale del 92% viene raggiunto all'interno della precarica.

Nel caso in cui la portata di ricircolo non fosse sufficiente a garantire il totale dell'acqua necessaria, è previsto l'approvvigionamento di acqua dalla rete pubblica.

In definitiva il quantitativo di materiale in ingresso al digestore deve tenere in conto le due portate del materiale selezionato e dell'acqua di processo:

$$\text{Portata di alimentazione al digestore} = 70000 + 154000 = 224000 \text{ kg/g}$$

2° fase - Determinazione del carico organico per m³ di reattore e calcolo del volume utile

Considerando i dati a disposizione, si sceglie un carico organico ottimale da applicare al digestore, in base agli intervalli utili di carico ed HRT per ciascun processo riportati in letteratura.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	2-6-4	6-8	6-9	2-5	6-20	9-15
Frazione organica da raccolta differenziata	2-3	3-4	4-6	2-5	4-10	6-9

Tabella 3.3 Valori del carico organico (OLR) nei vari processi (APAT GDL (2005))

Nel caso in esame, è stato scelto un valore del carico organico per m³ di reattore pari a :

$$OLR = 3,5 \text{ kgTVS/m}^3 \text{ d}$$

A questo punto, noto il carico che si vuole applicare ed il flusso di massa in TVS in ingresso, il volume del digestore è dato da:

$$TVS \text{ al giorno} / OLR (\text{kgTVS/m}^3 \text{ d}) = 4941 \text{ m}^3 \text{ di reattore}$$

Questo valore viene aumentato prudenzialmente a 5000 m³.

3° fase - Verifica delle condizioni operative

Il volume determinato, anche se corretto in linea di principio, può non soddisfare le condizioni di mantenimento dell'HRT ai valori desiderati. Per condurre questa verifica è necessario conoscere il volume di substrato da alimentare, da calcolare tenendo conto della diluizione del substrato.

$$\text{Volume del substrato di alimentazione} = V_{\text{FORSU}} + V_{\text{acqua}} = 140 + 154 = 294 \text{ m}^3/\text{g}$$

Noto quindi il volume del digestore, pari a 5000 m^3 ed il volume del substrato di alimentazione, è possibile calcolare il valore dell'HRT:

$$V_{\text{digestore}} / V_{\text{substrato}} = \text{HRT} = 17 \text{ g}$$

Il valore trovato si discosta poco dal valore assunto inizialmente, per cui il volume del digestore può essere considerato sufficiente a garantire il raggiungimento delle condizioni ottimali per favorire la produzione giornaliera di biogas.

Il substrato proveniente dalle vasche di alimentazione viene inviato al digestore, dimensionato per garantire un volume di 5000 m^3 di fanghi e di 3000 m^3 di gas; il sistema scelto è un cilindro avente le seguenti dimensioni:

diametro digestore = 28 m; altezza totale = 15,60 m; altezza netta = 11,40 m

spessore pareti = 0.40 m

fondo sagomato a doppia pendenza: esterna = 28%; interna = 56%

Il fondo del digestore è stato sagomato secondo uno schema a fondo ondulato, in maniera tale da garantire un'estrazione del digestato da 6 pozzetti laterali, posti ad intervalli regolari lungo la base del digestore, oltre al punto di estrazione centrale.

Viene utilizzato un opportuno sistema di coibentazione del digestore, per cui il calore disperso per le perdite non supera il 5 – 10 % del calore totale necessario a mantenere la temperatura necessaria al processo mesofilo. Il calore prodotto dal sistema di cogenerazione verrà sfruttato per il riscaldamento della massa in ingresso.

Per lo stoccaggio del biogas all'interno del digestore si è scelto di utilizzare il sistema di **cupola a 2 membrane** che garantisce, rispetto ad un gasometro a campana metallica flottante su vasca in cemento armato, i seguenti vantaggi:

- maggiore velocità di realizzazione ed installazione;
- maggiore economia di costruzione;
- non sono necessarie le classiche guide meccaniche che richiedono molta manutenzione e tendono, nel tempo, a bloccarsi;
- resistenza dei materiali plastici alla corrosione paragonabile a quella dell'acciaio inox;
- basso consumo energetico per l'immissione dell'aria di pressurizzazione;
- facilità di accesso e di ispezione dei componenti;
- semplicità gestionale, completamente automatizzata e senza la necessità di particolari operazioni di manutenzione ordinaria;
- possibilità di smontaggio e rimontaggio rapido per eventuali operazioni di manutenzione straordinaria o di ispezione;
- possibilità di sostituzione di ogni singola membrana in caso di deterioramento;
- possibilità di osservare l'interno della camera dell'aria attraverso l'oblò di ispezione;
- minore impatto visivo, grazie alla conformazione esterna fissa.

Viene inoltre garantita una buona agitazione in tutto il volume del reattore per consentire una distribuzione omogenea delle colonie di microrganismi; diversamente le parti non occupate dal fango sono solo dei depositi di acqua e nutrienti fino a quando non vengono in contatto con i batteri contenuti nel fango stesso. In effetti accade spesso che le parti superiori dei fermentatori risultino sostanzialmente inattive biologicamente e quindi inutili perché senza fango, con ovvie ricadute sul rendimento.

L'agitazione ha una formidabile importanza nel processo in quanto consente di mettere a contatto i batteri disposti in colonie con il materiale nutriente sia liquido che solido. La mancanza di flusso intorno ad un fiocco di fango ne rende influente la capacità di digestione; è pertanto importantissima un'agitazione efficiente, tanto più perché le colonie di batteri anaerobici metanigeni sono particolarmente voluminosi, e deve essere condotta dal basso verso l'alto per contrastare la tendenza alla sedimentazione del fango. Deve essere un'agitazione efficiente ma morbida, in grado di movimentare grandi volumi di liquido senza richiedere alti consumi di energia. Inoltre è necessario agitare la massa senza direzionare il flusso contro un punto qualsiasi del serbatoio o degli accessori: il fango anaerobico è infatti abrasivo e nel tempo erode meccanicamente le superfici esposte.

Pertanto, un'opportuna miscelazione del substrato è fondamentale per garantire i seguenti obiettivi:

- favorire il contatto tra batteri e substrato;
- evitare la presenza di zone morte;
- garantire una distribuzione omogenea della temperatura;
- ottimizzare il rilascio di biogas;
- evitare la sedimentazione del fango e la formazione di pellicole superficiali.

Gli agitatori meccanici sono generalmente soggetti ad abrasione e ad intasamento, a causa della presenza di particelle dure o fibrose, e richiedono pertanto frequenti interventi di manutenzione, per cui come sistema di miscelazione è stato scelto un sistema di diffusori di biogas installati sul fondo del bacino.

Il numero delle lance di insufflazione del biogas è stato ricavato partendo dai valori della portata di biogas giornaliera.

$$\text{Numero diffusori} = \text{Portata biogas} / \text{Portata singolo diffusore} = 360 / 60 \text{ m}^3/\text{h} = 6$$

Per ricircolare il biogas ed alimentare le lance di insufflazione viene utilizzato un compressore, che pompa il gas dall'alto del digestore e lo convoglia, attraverso delle tubazioni, ai diffusori.

Nel risalire all'interno delle lance di diffusione, il gas agita il fango e lo obbliga a fluire all'interno della vasca, grazie all'effetto di pompaggio degli stessi diffusori; si ottiene quindi una miscela di fango e biogas, la quale, percorrendo i diffusori viene in contatto con gli elementi elicoidali interni alle lance.

Grazie a tale fatto ed al prolungato contatto interfacciale, che si ottiene all'interno dei diffusori tra il biogas ed il fango, si facilita lo svolgimento della reazione di digestione anaerobica e lo sviluppo di ulteriori quantità di gas dal fango di processo.

Occorre considerare che non tutta la sostanza volatile viene completamente convertita in biogas. Infatti, dato che la sostanza organica non è composta solo dalla frazione rapidamente biodegradabile, per permettere una gassificazione quasi completa della sostanza volatile sarebbero necessari tempi di residenza volumetrica lunghissimi, con volumi e costi dei digestori non sostenibili. Nella pratica, perciò, si rinuncia a convertire in biogas tutta la sostanza volatile e si interrompe il trattamento biologico all'incirca quando tutta la frazione rapidamente biodegradabile è stata metabolizzata dai microrganismi. La sostanza volatile rimanente, infatti, viene aggredita dalla flora batterica con una lentezza tale da poter considerare ormai stabilizzata la sostanza organica alimentata.

Nel caso in esame, la produzione di $8646 \text{ m}^3/\text{g}$ di biogas equivale ad una trasformazione di sostanza organica di circa 12000 kg/g (considerando il valore della densità del biogas pari a $1,4 \text{ kg/m}^3$).

Il digestato estratto dal fondo del digestore presenta un tenore di sostanza secca maggiore rispetto alla percentuale di sostanza secca della miscela all'interno della vasca di digestione, per cui si assumono le seguenti percentuali delle componenti del digestato estratto giornalmente:

Portata del digestato in uscita = 210000 kg/g

Tenore di umidità del digestato = 93%

Sostanza secca del digestato = 7%

Il digestato, costituito da materia non digerita ed acqua, esce dal digestore allo stato liquido, per cui non può essere avviato direttamente alla sezione di compostaggio senza prima passare per una fase di disidratazione, al fine di ottenere un prodotto più concentrato (circa 30% di materia secca), avente caratteristiche fisiche compatibili con la successiva fase di stabilizzazione aerobica.

La scelta del sistema di disidratazione è stata fatta in funzione della granulometria delle particelle dure, del contenuto di secco del materiale da inviare alla stabilizzazione aerobica e delle caratteristiche dell'acqua di processo. In funzione di questi parametri è stato scelto di utilizzare una centrifuga.

Prima della fase di disidratazione, è previsto l'inserimento di una vasca di 100 m^3 di volume (corrispondenti all'estrazione di digestato per due ore) che permette un'alimentazione uniforme alla macchina.

La disidratazione del digestato permette di passare ad un tenore di sostanza secca del 30% , ottenendo i seguenti flussi di materiale:

Portata di fango disidratato (al 70% di umidità) = 47700 kg/g

Portata di acqua inviata alle vasche di precarica = $162300 \cdot 0,7 = 113600 \text{ kg/g}$

Portata di acqua inviata alla depurazione = $162300 \cdot 0,3 = 48700 \text{ kg/g}$

Il fango digerito prodotto dalla fase di metanizzazione risulta in genere non completamente stabilizzato, a causa del ridotto tempo di residenza all'interno del reattore. A tale scopo è prevista la fase di stabilizzazione aerobica, finalizzata al completamento della degradazione della materia organica, più difficilmente degradabile, ed all'ottenimento dell'igienizzazione del materiale.

Sistema di trattamento delle acque: Il liquido in uscita dalla centrifuga, invece, viene diviso in due parti:

1. Una parte (circa il 30%), corrispondente a 48,7 t/d, è avviata alla fase di trattamento chimico - fisico e successivamente alle vasche di raccolta che servono all'irrorazione dei biofiltri ed al ricircolo delle acque nelle torri di lavaggio (scrubber) per l'alimentazione dell'impianto di spremitura; preliminarmente al trattamento chimico - fisico è previsto l'accumulo in una vasca di 100 m³ di volume che permette lo stoccaggio dell'acqua di processo in caso di afflusso alla fase di depurazione di acque meteoriche per due giorni;
2. la parte restante (circa il 70%), corrispondente a 113,6 t/d, è direttamente ricircolata alle vasche di precarica.

Questa separazione dei flussi assume una notevole importanza sia dal punto di vista economico, che di riduzione degli impatti:

- dal punto di vista economico, si riduce la necessità di approvvigionamento di acqua dall'esterno, considerando i notevoli volumi necessari alla diluizione del substrato per il mantenimento del tenore di umidità necessario per il processo a umido;
- dal punto di vista ambientale, permette che una parte dell'acqua di ricircolo venga preventivamente depurata, in modo tale da ridurre il carico di sostanze inquinanti nelle acque di processo.

A maggior garanzia di contenimento delle sostanze inquinanti, sono previsti due serbatoi di accumulo da 50 m³ ciascuno, che permettono periodicamente di mandare a depurazione esterna ogni 20 giorni i liquidi in uscita dall'impianto di disidratazione; per compensare questa perdita d'acqua di processo, nel caso in cui le acque di pioggia non fossero sufficienti a garantire la portata necessaria al ricircolo, è previsto il reintegro dalla rete pubblica di 5 m³/g, da aggiungere nella vasca di accumulo interposta fra l'impianto di spremitura e le vasche di precarica.

Il sistema di raccolta delle acque meteoriche di progetto è di tipo lineare a gravità. Il progetto prevede che le acque di piazzale raccolte attraversino un impianto di trattamento progettato per sottoporre le acque meteoriche rivenienti dal piazzale ad un trattamento di grigliatura, sedimentazione e disoleazione; le acque di seconda pioggia, così trattate, vengono inviate alle vasche di raccolta.

Le acque di prima pioggia passano, invece alla successiva fase che prevede l'eliminazione delle sostanze pericolose (Tab. 5, dell'Allegato 5 alla Parte III, accluso al D. Lgs.n. 152/2006) ovvero di tutte quelle potenzialmente dannose per l'ambiente (Allegato Tab. 8, Parte III, D. Lgs. n. 152/2006), secondo un ciclo chimico-fisico, prima di essere inviate alle vasche di raccolta per essere riciclate come acque di processo.

Le acque meteoriche di dilavamento, in arrivo al pozzetto di partizione, corrispondenti a quelle di prima pioggia (normalmente correlate ad un'altezza di precipitazione uniforme pari a 5 mm), sono avviate per gravità alla vasca di accumulo, il cui equipaggiamento ne permette la chiusura idraulica, una volta che sia stato raggiunto il volume normale richiesto.

Le acque di prima pioggia sono inviate nel suddetto bacino di accumulo, di capacità tale da contenere tutto il volume delle acque meteoriche di dilavamento, risultante dai primi 5 mm di pioggia caduta sulla superficie impermeabile scoperta pari a 13279 m².

Nel periodo successivo, corrispondente al deflusso delle acque di seconda pioggia (acque, cioè, eccedenti i primi 5 mm), non essendo possibile l'ingresso in tale vasca, il livello idrico rigurgita nel pozzetto partitore salendo sino alla quota di sfioro, deviando così, le stesse, verso il trattamento secondario di sedimentazione e disoleatura.

$$V_{\text{acque di pioggia}} = S (\text{superficie impermeabile scoperta pari a } 13279 \text{ m}^2) \times 5 \text{ mm} = 66 \text{ m}^3$$

Si prevede uno stoccaggio, in via cautelativa, delle acque di prima pioggia in una vasca di accumulo di 160 m³.

Il digestore anaerobico integrato previsto in progetto, produce circa 210 t/d di digestato con un tenore di S.S. del 7%. Questo viene trasferito in una vasca interrata di accumulo ed omogeneizzazione di circa 100 m³ e successivamente inviato alla disidratazione:

1. Il 70% della parte liquida rappresentata da circa 113,6 m³/g viene inviata a mezzo elettropompa alle vasche di precarica del reattore anaerobico; il rimanente 30% rappresentato da circa 48,7 m³/g, è inviato all'impianto di trattamento del tipo chimico-fisico ;
2. La parte solida prodotta dalla centrifuga nella quantità di circa 48 t/g è rappresentata da fango disidratato al 30% di S.S. e non essendo contaminato da reagenti chimici ed ancora molto ricco di sostanza organica, viene inviato al compostaggio per la produzione di compost di qualità.

3.1.5 Dimensionamento della fase di recupero energetico del biogas

La produzione di biogas costituisce uno dei principali vantaggi della digestione anaerobica dei rifiuti, grazie al consistente recupero energetico che si riesce a conseguire tramite il suo utilizzo. Pertanto l'intero processo deve essere condotto in maniera tale da massimizzare le rese di metanizzazione.

La portata all'uscita dal digestore può presentare però delle variazioni importanti, cui corrisponde anche una variazione della qualità del biogas prodotto, il cui tenore in metano può oscillare dal 45 al 65 %.

Queste variazioni sono dovute alla differente velocità di degradazione dei diversi componenti della materia organica degradabile. Infatti, poco dopo l'introduzione del substrato nel digestore, i primi componenti si degradano, producendo un biogas molto ricco di anidride carbonica, mentre gli altri componenti si degradano più tardi con produzione di un biogas più ricco in metano.

I due parametri, portata e concentrazione di CH₄, variano in senso opposto: durante il caricamento del digestore si ha una grande portata di biogas a basso contenuto di metano, mentre lontano del caricamento, si ha una portata ridotta ma ricca di metano.

Il rendimento in biogas del processo, espresso in termini di m³/kgTVS alimentati, è molto variabile e dipende dalla frazione biodegradabile del substrato. Infatti non tutta la sostanza organica presente nel digestore viene convertita in biogas, ma solo una sua frazione.

All'uscita del digestore va prevista una filtrazione per eliminare le particelle liquide o solide che potrebbero essere trascinate dal biogas.

Questo semplice sistema permette di proteggere le soffianti o i compressori che verranno utilizzati per l'alimentazione del gas alla fase di cogenerazione.

La produzione di biogas giornaliera è stata calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$\text{Produzione giornaliera di biogas} = 0,50 \text{ m}^3/\text{kgTVS} \times 17293 \text{ kgTVS/g} = 8646 \text{ m}^3/\text{g}$$

Stimando un potere calorifico inferiore di 5500 kcal/m^3 , si ricava la potenzialità energetica giornaliera:

$$\text{Potenzialità energetica} = 5500 \text{ kcal/m}^3 \times \text{m}^3 \text{ biogas/g} = 47'553'000 \text{ kcal/g}$$

La spesa energetica per riscaldamento consta di due voci:

1. il riscaldamento del rifiuto in ingresso alla temperatura di esercizio per il mantenimento del processo in regime mesofilo;
2. le perdite di calore del digestore.

Prima dell'utilizzo a fini energetici il biogas deve essere sottoposto ad opportuni trattamenti di depurazione. Infatti la presenza di anidride carbonica, azoto ed acqua provoca l'abbassamento del potere calorifico della miscela, mentre sostanze come l'idrogeno solforato ed i composti organici alogenati, che possono essere presenti nel biogas, si comportano da agenti corrosivi, causando sensibili danni agli impianti di utilizzazione.

Tali trattamenti sono finalizzati ad ottenere un sensibile abbassamento dei costi di conduzione e manutenzione delle macchine, un funzionamento ottimale ed una maggior affidabilità, oltre alla garanzia di rispetto dei limiti di emissione imposti dalla legge.

Per l'aspirazione e la mandata del biogas dal digestore all'impianto di cogenerazione, è previsto l'utilizzo di un sistema di due soffianti e aspiratori, da posizionare a valle del sistema di trattamento del biogas e della torcia.

I filtri a ghiaia vengono utilizzati come elemento per la filtrazione primaria, dispositivo di sicurezza contro i ritorni di fiamma e come scaricatori di condensa lungo le linee di trasporto biogas.

I filtri a candele ceramiche vengono installati lungo le linee di trasporto biogas, solitamente a monte dei sistemi di recupero energetico, per la rimozione di particelle fini e per l'accumulo e scarico di condensa.

Il trattamento di deumidificazione è necessario in quanto l'umidità, di cui il biogas è saturo, può condensare all'interno delle tubazioni, in seguito a variazioni di temperatura e/o pressione, provocando malfunzionamenti. Il sistema di deumidificazione è costituito da un gruppo frigorifero in grado di raffreddare il gas da inviare ai motori. In tal modo si separa dalla miscela gassosa l'umidità che, condensando, viene allontanata precipitando al contempo sostanze nocive e corrosive presenti nel flusso gassoso stesso.

Quando i livelli di idrogeno solforato sono elevati è necessario prevedere dei sistemi di abbattimento integrativi, ad umido o a secco, della sola deumidificazione. In aggiunta al desolforatore è previsto l'impiego di un filtro a carboni attivi.

In tutti gli impianti con produzione di biogas è necessario prevedere la presenza di una torcia di emergenza che garantisca la combustione del biogas prodotto.

Il dimensionamento della torcia è fatto in modo tale da consentire non solo la combustione della portata normale del biogas, ma anche dei quantitativi provenienti dall'eventuale svuotamento rapido di tutti gli stoccaggi.

La torcia di sicurezza deve consentire la combustione del biogas in condizioni di emergenza, assicurando:

- il mantenimento di valori di temperatura adeguati a limitare l'emissione di inquinanti e la produzione di fuliggine;
- l'omogeneità della temperatura all'interno della camera di combustione;
- un adeguato tempo di residenza del biogas all'interno della camera di combustione;
- un sufficiente grado di miscelazione tra biogas e aria di combustione;
- un valore sufficientemente elevato della concentrazione di ossigeno libero nei fumi effluenti.

Al fine di conferire al sistema una maggiore affidabilità la torcia è dotata di sistemi automatici di accensione e controllo della fiamma. Il tempo di funzionamento viene calcolato tenendo conto dei tempi di manutenzione dei gruppi.

Di seguito sono riportati i dati tecnici della torcia scelta in fase di progettazione.

Torcia biogas tipo HE 550

- Tipo di fiamma : interamente contenuta
- Portata massima : 550 Nm³/h a 60% di CH₄
- Materiale costruzione : interamente in acciaio inox AISI 304
- Temperatura di combustione : < 800 °C
- Tensione di alimentazione : 230 V - 50 Hz monofase
- Pressione aria compressa : > 5 bar (valvola pilota e principale)

La produzione di biogas avviene alla pressione del digestore, generalmente vicina alla pressione atmosferica. Dal momento che lo stoccaggio ed il trasporto richiedono una compressione importante e quindi costi non trascurabili, si cerca in genere di utilizzarlo per la produzione di una forma di energia direttamente utilizzabile sul sito di produzione o con costi di trasporto ridotti.

Il biogas prodotto viene utilizzato per la produzione combinata di calore e biogas (cogenerazione) con l'utilizzo di due motori tipo GE - Jenbacher da 499 kW, le cui caratteristiche tecniche sono indicate in tabella 3.4.

Scheda tecnica cogeneratori

Dati tecnici (al modulo)		Pieno carico		Carico parziale	
Potere calorifico inferiore del gas (PCI)		kWh/Nm ³	4,5		
			100%	75%	50%
Potenza introdotta		kW	1.221	948	678
Quantità di gas		Nm ³ /h	271	211	151
Potenza meccanica		kW	515	387	260
Potenza elettrica		kW el.	499	374	249
Potenze termiche recuperabili					
~ Primo stadio intercooler		kW	56	15	~
~ Olio		kW	57	47	39
~ Acqua di raffreddamento motore		kW	190	173	135
~ Gas di scarico raffreddati a 416 °C		kW	~	169	128
Potenza termica complessiva		kW	303	404	302
Potenza erogata complessiva		kW totale	802	778	551
Potenza termica da dissipare					
~ Secondo stadio intercooler		kW	25	15	2
~ Olio		kW	~	~	~
~ Calore in superficie	ca.	kW	48	47	47
~ Potenza termica rimanente		kW	12	9	7
Consumo specifico del motore		kWh/kWh	2,37	2,45	2,61
Consumo olio motore	ca.	kg/h	0,15	~	~
Rendimento elettrico		%	40,9%	39,5%	36,8%
Rendimento termico		%	24,8%	42,6%	44,5%
Rendimento complessivo		%	65,7%	82,1%	81,3%
Circuito acqua calda:					
Temperatura di mandata		°C	85,0	91,7	85,0
Temperatura di ritorno		°C	65,0	65,0	65,0
Portata nominale		m ³ /h	13,0	13,0	13,0

Dati Tecnici del Motore

Ciclo di funzionamento		4-tempi
Disposizione cilindri		V 70°
Numero cilindri		12
Alesaggio	mm	135
Corsa	mm	170
Cilindrata	lit	29,20
Velocità nominale	rpm	1.500
Velocità media del pistone	m/s	8,50
Lunghezza	mm	2.400
Larghezza	mm	1.457

Altezza	mm	2.065
Peso a secco	kg	3.500
Peso pronto per l'esercizio	kg	3.830
Momento d'inerzia del volano	kgm ²	7,77
Senso di rotazione (visto lato volano)		a sinistra
Attacco volano		SAE 18"
Livello dist. radio sec. VDE 0875		N
Motorino d'avviamento.: pot.	kW	7
Motorino d'avviamento.: tensione	V	24
Potenze termiche		
Potenza introdotta	kW	1.221
Intercooler	kW	81
Olio	kW	57
Acqua di raffreddamento motore	kW	190
Gas di scarico totale	kW	333
Gas di scarico raffreddati a 180 °C	kW	205
Gas di scarico raffreddati a 100 °C	kW	272
Calore in superficie	kW	32
Potenza termica rimanente	kW	12
Dati gas di scarico		
Temperatura gas di scarico a pieno carico	°C [8]	416
Portata gas di scarico umido	kg/h	2.782
Portata gas di scarico secco	kg/h	2.585
Volume gas di scarico umido	Nm ³ /h	2.163
Volume gas di scarico secco	Nm ³ /h	1.926
Contropressione massima gas di scarico all'uscita motore	mbar	60
Dati aria di combustione		
Portata aria	kg/h	2.564
Volume aria	Nm ³ /h	1.984
Perdita di pressione massima in aspirazione	mbar	10

Tabella 3.4 Scheda tecnica motori GE – Jenbacher (Ingegneria e Servizi (2012))

La scelta di utilizzare due motori in luogo di un singolo motore da 999 kW si basa su considerazioni di carattere economico e gestionale.

Dal punto di vista economico va tenuto presente che non si ha mai la garanzia di un funzionamento a pieno carico del digestore anaerobico, con conseguente riduzione della produzione teorica di biogas; utilizzando un singolo motore, questi scompensi determinerebbero un funzionamento non ottimale dell'unità, con un drastico calo dei rendimenti.

Dal punto di vista gestionale si garantisce una maggiore flessibilità, poiché l'uso di due motori permette di coprire eventuali manutenzioni di una delle due unità, mantenendo la possibilità di uno sfruttamento parziale dell'impianto di cogenerazione.

Una parte dell'energia elettrica prodotta andrà a coprire gli autoconsumi dell'impianto, mentre la restante parte può essere utilizzata per la produzione di energia da cedere all'esterno.

3.1.6 Dimensionamento della fase di compostaggio

La “digestione aerobica” è l’ultima fase di trattamento del processo descritto dal presente progetto, dopo che la FORSU è stata trattata dalla fase di “pretrattamento” e di “digestione anaerobica”.

Il contenuto di umidità del materiale da compostare e l’uniformità, specialmente se si vuole ottenere un prodotto finale di qualità, sono elementi di estrema importanza. Poiché l’ossigeno si diffonde molto più lentamente nell’acqua che nell’aria, *il contenuto di acqua presente influenza notevolmente il processo. L’eccesso di umidità riduce la diffusione dell’ossigeno.* Questa riduzione dipende da due fattori:

1. le particelle di compost sono "idrofile" e quindi l’acqua viene legata alla superficie, aumentando così lo strato che l’ossigeno deve attraversare per attivare i processi di decomposizione;
2. "effetto motrice" dovuto alla capillarità; l’acqua riempie inizialmente le porosità più piccole e così crea delle zone acquose tra le particelle che rallentano la diffusione dell’ossigeno e si trasformano in agglomerati o zone in cui l’unica condizione di decomposizione possibile è quella anaerobica.

E’ stato proprio questo presupposto a suggerire l’interposizione tra la fase di digestione anaerobica e quella aerobica di un sistema di disidratazione che permette di passare ad un tenore di sostanza secca del 30%, e quindi tale da raggiungere la maturazione in tempi inferiori e con miglior risultato. In questo modo si garantisce la porosità del substrato al 35% e si riducono notevolmente i consumi di energia necessaria per insufflare aria.

All’interno dei comparti di maturazione, sono state previste due reti indipendenti di alimentazione del sistema di umidificazione. Una rete è alimentata con le acque di scarico filtrate, mentre l’altra è collegata alla rete acqua dello stabilimento. In questo modo si evita di spargere liquido con agenti patogeni nei comparti che hanno già superato la fase di igienizzazione.

Durante il processo di maturazione, in funzione delle temperature rilevate sul materiale, viene variata la portata d’aria di insufflazione per favorire il riscaldamento o il raffreddamento della massa. Sono installate a tal fine su ciascun comparto delle sonde per monitorare la condizione termica del cumulo di rifiuti.

Ai fini del controllo del processo, il sistema considera la media delle temperature che vengono rilevate dalle sonde, se una sonda dovesse guastarsi o discostarsi anormalmente dai valori delle altre, viene esclusa dal sistema di controllo.

Altro accorgimento riguarda la realizzazione di 2 setti di separazione in c.a., utili a differenziare le corsie di maturazione in 4 comparti stagni, tali da rendere facilmente distinguibili e gestibili i cumuli in coltivazione, una volta che gli stessi hanno raggiunto il ciclo di permanenza previsto di sette giorni.

Per quel che riguarda la vagliatura, si provvede con un vaglio rotante, con porte d’ispezione insonorizzate che riducono notevolmente gli impatti acustici all’interno del capannone; questo vaglio servirà ad affinare la qualità del compost separando le particelle grossolane.

Per il controllo dei cattivi odori e delle polveri generati nelle diverse fasi di lavorazione, la riduzione dell'umidità nel film liquido proveniente dalla fase anaerobica è di per sé un efficace sistema di riduzione delle emissioni maleodoranti. A ciò v'è da aggiungere la presenza dei biofiltri, con capacità tali da garantire le necessità volumetriche in funzione delle dimensioni dei capannoni e delle lavorazioni a cui servono.

Per quanto riguarda le polveri che potrebbero prodursi sono stati previsti degli scrubber a monte dei biofiltri per abbattere sia le polveri che le sostanze azotate ed ammoniacali in eccesso.

Secondo criteri usuali di dimensionamento, in presenza di esalazioni maleodoranti di origine organica, si sono assunti i seguenti ricambi orari e volumi di aspirazione concentrata nei capannoni:

Capannone ricezione rifiuti e pretrattamento: $V = 5856 \text{ m}^3$ ricambi/h = 3

Capannone compostaggio: $V = 9800 \text{ m}^3$ ricambi/h = 4

I biofiltri sono bioreattori a letto fisso costituiti da un supporto di materiale organico su cui viene fatta sviluppare una opportuna popolazione batterica, la cui funzione è quella di degradare biologicamente le sostanze organiche volatili a composti elementari quali anidride carbonica, azoto e acqua.

Dal punto di vista impiantistico un biofiltro è costituito da un reattore contenente una massa filtrante di natura vegetale molto porosa; il gas da depurare viene distribuito da appositi ugelli e sale attraversando il letto di materiale organico. Il materiale filtrante, di spessore pari a 2 m è mantenuto umido mediante irrorazione di acque di ricircolo captate a valle della depurazione, mentre il liquido di percolazione viene ricircolato negli scrubber. Il tempo di permanenza del gas nel biofiltro è variabile, ma non scenderà mai sotto la soglia dei $120 \text{ Nm}^3/\text{h} \times \text{m}^3$.

I ventilatori dotati di inverter permettono di controllare le portate, variandole in funzione della risposta del sistema, e quindi dell'efficienza di abbattimento. In aggiunta, per migliorare ulteriormente il trattamento dell'aria, è previsto l'uso di uno scrubber per ciascun biofiltro.

La popolazione microbica non proviene da particolari ceppi, ma si seleziona durante il periodo di acclimatazione (durata media 15 - 20 giorni); il processo di selezione può, se necessario, essere accelerato tramite inoculi ad hoc.

Generalmente la temperatura ideale per il funzionamento del sistema è quella ambiente; entro certi limiti, la popolazione microbica sopporta variazioni di temperatura, ma sia ha di conseguenza una riduzione dell'efficienza di abbattimento. In caso di variazioni brusche (soprattutto aumento) della temperatura, si può verificare una disattivazione della biomassa; i limiti di temperatura critici, dipendono dal ceppo attivo, dal sistema in cui è utilizzato e dalle condizioni operative di regime; se la temperatura non esce molto dall'intervallo citato, è possibile che il sistema ritorni in attività mediante un periodo di acclimatazione, alla temperatura di progetto.

In seguito alla fase di irrorazione viene prodotto a valle dei letti un percolato che viene riciclato nello scrubber. L'acqua di processo per irrorare la superficie dei biofiltri viene riutilizzata senza trattamenti particolari, anche se mediamente ogni 6 mesi è necessario effettuare uno spurgo per garantire un corretto funzionamento del sistema.

Possono essere utilizzati ceppi batterici differenziati per diverse applicazioni: la popolazione microbica deve essere selezionata in funzione delle caratteristiche di composizione delle emissioni da depurare, sulle quali è sempre necessario verificare l'assenza di potenziali veleni, che possono inibire le reazioni biologiche, abbassando l'efficienza del sistema.

La manutenzione non necessita di interventi programmati da parte di personale specializzato, ma solo del mantenimento delle condizioni di umidificazione.

In tempi lunghi si può rendere necessario un rivoltamento della biomassa ed un intervento della ditta fornitrice sul supporto dei microrganismi o per reintegrare la stessa popolazione di microrganismi. Questo intervento può essere necessario anche nel caso il sistema subisca shock termici o chimici che causino rispettivamente la degradazione fisica del supporto o la diminuzione di popolazione batterica vitale.

Gli scrubber garantiranno un'elevata efficienza di rimozione anche per particelle intorno al micron.

L'efficienza del sistema è tanto spinta quanto più alta risulta essere:

- la pressione dell'acqua nebulizzata;
- il tempo di contatto e quanto più bassa è la velocità di passaggio dell'aria.

Al termine delle fasi di compostaggio e successiva vagliatura, il compost viene trasferito in apposita area per la fase di maturazione lenta. Tale area è rappresentata da un capannone chiuso in struttura metallica avente una superficie planimetrica di circa 700 m². La superficie è stata suddivisa in tre piazzole pavimentate e delimitate con idonea muratura, dove vengono stoccati i cumuli di compost. Circa un quarto dell'area è dedicata ad un'eventuale fase di vagliatura per l'ulteriore raffinazione del prodotto da immettere sul mercato.

3.2 Impatti sull'ambiente e sicurezza

3.2.1 Quadro di riferimento della sicurezza

Gli effetti di tali impatti, che riguardano principalmente le componenti impiantistiche, vanno valutati sia in fase di cantiere che fase di esercizio, tenendo presente che negli impianti di trattamento meccanico e biologico le principali problematiche di sicurezza e di prevenzione degli infortuni sono legate ai macchinari in uso.

Presso le stazioni di trattamento biologico sono di primaria importanza ai fini della sicurezza aspetti quali:

- esposizione alle polveri;
- esposizione alle endotossine;
- contatto con aerosol ed eventuali sostanze chimiche e tossiche;
- rumori;
- rischi connessi con l'uso delle macchine.

Per affrontare tale problematica si riporta di seguito un elenco sintetico dei rischi presenti:

- rischio biologico connesso con la presenza dei rifiuti;
- rischio di abrasioni con parti taglienti o similari contenuti nei rifiuti;
- rischio di incendio;
- rischio di inalazione di polveri durante le movimentazioni dei rifiuti;
- rischio rumore;
- rischi meccanici derivanti dalla presenza di macchine in movimento;
- rischi di investimento derivanti dalla presenza di macchine operatrici in movimento;
- rischi derivanti da uso improprio o non conforme dei macchinari;
- rischio chimico (per la potenziale formazione di composti chimici quali Ammoniaca e Idrogeno Solforato nelle zone in cui avviene l'ossidazione del materiale organico);
- rischio di elettrocuzione derivante dalla presenza di apparecchiature elettriche.

Le misure adottate per prevenire e ridurre i rischi per il personale addetto agli impianti consistono essenzialmente nei seguenti accorgimenti :

- Impedire l'eccessiva disidratazione delle matrici organiche in corso di trattamento e del prodotto finale.
- Umidificare il prodotto finale stoccato, a maggior ragione se da lungo tempo, prima di qualsiasi movimentazione.
- Pavimentare le superfici di lavoro e la viabilità interna della stazione di trattamento.
- Confinare, dove possibile, le operazioni di vagliatura e confezionamento del prodotto finale in strutture chiuse, dotate di sistema di aspirazione e filtrazione dell'aria.
- Proteggere i lavoratori dall'esposizione alle polveri in coincidenza delle operazioni maggiormente responsabili della formazione di bioparticolato (es. rivoltamento dei cumuli), usando macchine operatrici a cabina chiusa e climatizzata.
- Applicare sistemi di trattamento ad aerazione forzata della matrice in trasformazione piuttosto che basati sul rivoltamento periodico dei cumuli.

Mentre i rifiuti organici di origine vegetale presentano una modesta carica di microrganismi potenzialmente patogeni per l'uomo, il quadro cambia nel caso di trattamento dei fanghi derivanti dal processo di digestione.

Poiché questi ultimi contengono un'elevatissima concentrazione di organismi patogeni, si richiede, da parte degli operatori, un'osservanza maggiormente scrupolosa delle normali misure di sicurezza (es. uso di indumenti da lavoro adatti, lavaggio delle mani prima di toccare cibi e bevande o gli occhi, etc.).

Uno degli aspetti più critici nella manipolazione dei fanghi, specialmente quando questi vengono impiegati allo stato fluido nella preparazione delle miscele di partenza per il trattamento anaerobico, è rappresentato dalla possibile formazione e dispersione di aerosol trasportatori di agenti patogeni.

Le micro gocce sospese nell'aria, contenenti cellule microbiche o particelle virali, costituiscono un veicolo potenziale di infezione, nei confronti del quale è stato previsto il confinamento al chiuso delle operazioni di miscelazione e l'impiego di apposite maschere e guanti da parte degli operatori addetti alla manipolazione dei fanghi.

Le varie fasi di pretrattamento, così come descritte in precedenza, mirano principalmente automatizzare il più possibile il ciclo di pretrattamento della FORSU, a vantaggio della sicurezza sui luoghi di lavoro e dell'ambiente, limitando gravose movimentazioni dei sottoprodotti, con confinamento della FORSU e la lavorazione in un'unica area (ricezione e pretrattamento) dotata di opportuni presidi ambientali per il trattamento dell'aria e dello sversamento accidentale del percolato.

L'area relativa al conferimento e pretrattamento è tenuta costantemente in depressione da un sistema di aspirazione che provvede a ricambiare l'aria almeno 4 volte ogni ora. L'aria aspirata viene inviata ad un impianto di depurazione / deodorizzazione dotato di scrubber e biofiltro.

Il sistema così definito è stato ottimizzato per consentire l'alimentazione dell'impianto in automatico, praticamente senza alcun intervento da parte dell'unico operatore, quindi con notevole vantaggio ai fini della sicurezza.

Per la gestione del biogas, in nessuna fase operativa può verificarsi la formazione di miscele gassose a rischio di esplosione.

Prima dell'apertura del digestore viene effettuato lo svuotamento preventivo del biogas presente all'interno per evitare che l'ingresso di aria dall'esterno possa determinare la formazione di una miscela esplosiva. Durante le fasi di riempimento e svuotamento, un dispositivo di aspirazione, posto nella parte posteriore del digestore, provvede all'afflusso continuo di aria fresca all'interno del digestore stesso.

Inoltre il gasometro a cupola a due membrane risulta estremamente vantaggioso rispetto al tradizionale gasometro con campana metallica flottante su vasca in cemento armato.

Come soluzione migliorativa per ridurre al minimo il rischio di esplosioni è previsto l'impiego dei seguenti metodi:

- stoccaggio del biogas solamente nella parte superiore del digestore, onde eliminare possibili incidenti legati al contenimento del biogas;
- monitoraggio delle concentrazioni di CH_4 , CO_2 , O_2 e H_2S nei punti cruciali dell'impianto, quali l'uscita dal digestore e l'ingresso del motore, in modo da tenere sotto controllo lo stato del processo e, di conseguenza, la comparsa di eventuali anomalie.

La composizione del biogas che alimenta il sistema di cogenerazione viene monitorata in continuo per mezzo di in quadro analisi biogas, al fine di evitare malfunzionamenti dei motori, ed in caso di caratteristiche non idonee del gas una valvola di blocco avvia i gas direttamente in torcia.

Nel caso in cui il biogas non possa essere alimentato al cogeneratore, può essere bruciato in condizioni controllate tramite un dispositivo a torcia del tipo a fiamma contenuta.

Per quanto riguarda la digestione aerobica, particolare attenzione va posta al rischio di incendio, per contenere il quale, si fa in modo che il materiale in trasformazione venga sempre mantenuto con livelli di umidità tali da evitare rischi di combustione spontanea, che, seppure limitati, vanno tenuti in debita considerazione.

Inoltre, onde evitare una eccessiva disidratazione, si fa in modo che le matrici organiche in corso di stabilizzazione non raggiungano altezze di accumulo superiori a 3,00 metri, in modo da evitare l'autocombustione.

Per il controllo dei cattivi odori e delle polveri generati nelle diverse fasi di lavorazione, va evidenziato che la riduzione dell'umidità nel film liquido proveniente dalla fase anaerobica, è di per sé un efficace sistema di riduzione delle emissioni maleodoranti. A ciò va aggiunta la presenza dei biofiltri.

3.2.2 Quadro di riferimento ambientale

Si riportano di seguito le componenti analizzate, articolate nei possibili recettori di impatto che le caratterizzano:

ATMOSFERA

- *Qualità dell'aria* valutata per i principali inquinanti monitorati;
- *Odori* valutati localmente.

AMBIENTE IDRICO

- *Qualità delle acque superficiali*;
- *Qualità delle acque sotterranee*: qualità delle acque sotterranee nell'area dell'impianto;
- *Consumi idrici*: si fa riferimento ai prelievi dalla fonte di approvvigionamento.

SUOLO E SOTTOSUOLO

- *Geomorfologia*: intesa come modifica della situazione geomorfologica dei siti in relazione alla presenza dell'impianto;
- *Idrogeologia*: si intende le interferenze con l'assetto idrogeologico del sito dove si realizzeranno le opere;
- *Rischio idraulico*: valutazione delle possibili interferenze nella realizzazione del progetto in riferimento alla pericolosità idraulica del luogo;
- *Permeabilità dei suoli* nell'area delimitata dal perimetro dell'impianto.

VEGETAZIONE, FLORA E FAUNA - ECOSISTEMI

- *Superfici vegetate* nei pressi dell'impianto;
- *Disturbo alla fauna* nei pressi dell'impianto;
- *Frammentazione di habitat* nei pressi dell'impianto.

COMPONENTI ANTROPICHE

- *Livelli sonori*: inquinamento acustico locale;
- *Traffico*: incidenza dell'esercizio dell'impianto sul traffico esistente nei pressi dell'area;
- *Energia*: incidenza nel consumo/produzione di energia del processo di biodigestione;
- *Rifiuti*: incidenza del processo nel ciclo di gestione dei rifiuti;
- *Pubblica utilità*: soddisfacimento della necessità di smaltimento rifiuti.

a) Impatti e mitigazioni in fase di cantiere

La fase di cantiere è molto limitata perché si riferisce alla realizzazione delle opere edili ed impiantistiche a servizio dell'insediamento. Durante la fase di cantiere, gli impatti sono limitati in quanto di durata temporale breve, di estensione limitata e dovuti ai tipici disturbi legati ad un cantiere edile.

Atmosfera: Le emissioni in fase di cantiere sono dovute principalmente a polveri durante i modesti lavori di scavo e di movimentazione della terra necessari. Un impatto di minore importanza è quello dovuto alle immissioni di inquinanti da parte dei motori dei mezzi di cantiere.

Ambiente idrico: Gli scarichi idrici in fase di cantiere sono inviati negli ampi spazi a verde interni all'impianto.

Suolo e sottosuolo: Non sussistano particolari motivi di impatto di ordine geologico per le opere previste, in quanto le opere più importanti vengono realizzate fuori terra. Tutte le opere costruite in cemento armato (vasche e digestori) sono edificate fuori terra, lasciando interrate le sole opere di fondazione ed alcune vasche di modesta entità. Di conseguenza l'impatto è considerato trascurabile.

Vegetazione, flora e fauna, ecosistemi: Le fasi di cantiere comportano un impatto negativo modesto temporaneo per la fauna. Le attività di cantiere comportano un fattore di disturbo, dovuto al rumore e alla presenza di mezzi in movimento; è importante evidenziare però che l'ambito del progetto non è frequentato da molte specie faunistiche. Si verifica un impatto negativo non rilevante per la vegetazione, in quanto riguarda una zona già pavimentata.

Livelli sonori: In merito ai livelli sonori si stima un impatto trascurabile temporaneo in quanto non vi sono fonti di rumore al di fuori delle attrezzature e delle macchine utilizzate per le lavorazioni, durante gli orari imposti dai regolamenti locali.

Traffico: La fase di cantiere genera un traffico di entità trascurabile e per una durata temporale limitata, incapace di interferire con il traffico insistente sulla rete infrastrutturale di accesso all'area dell'impianto.

Rifiuti: I rifiuti prodotti dalla fase di cantiere derivano dalle terre di scavo che non trovano un utilizzo all'interno dell'area dell'impianto e gli scarti derivanti dalla fase di costruzione edile e meccanica. Tali materiali sono raccolti in appositi cassoni collocati in zone all'interno del cantiere e sono per quanto possibile riutilizzati, altrimenti smaltiti in impianti autorizzati.

b) Impatti e mitigazioni in fase di esercizio

Atmosfera: Nello specifico le potenziali emissioni in atmosfera possono derivare da:

- biofiltri nella fase di digestione;
- sala di conferimento dal materiale organico (emissioni odorigene);
- motori di cogenerazione;
- mezzi in ingresso e uscita dall'impianto;
- stoccaggio del verde;
- torcia.

Durante le fasi di trattamento dei rifiuti organici si genera un impatto negativo modesto dovuto a monossido di carbonio, ossidi di azoto e di carbonio organico totale dai camini dei motori dei cogeneratori, polveri derivanti dalla triturazione del verde e delle ramaglie e dalla fase di raffinazione del compost.

Gli impatti generati dalla fase di combustione del biogas sono mitigati, utilizzando un sistema di post combustione dei fumi dei cogeneratori, attraverso cui sono abbattute le emissioni di monossido di carbonio e di idrocarburi non metanici. Con tale sistema si assicura un'adeguata depurazione dei fumi tali da rispettare i limiti imposti dal D.lgs. 152/2006.

Le emissioni di polveri provenienti dalla fase di triturazione si ritengono limitate all'intorno più prossimo dell'impianto. Si potranno verificare emissioni di polveri dalla fase di vagliatura del compost, anche in questo caso l'attività sarà eseguita al coperto e ci sarà una diffusione di polveri limitatamente all'intorno dell'ambito senza raggiungere ricettori sensibili.

Le emissioni di tipo diffuso sono essenzialmente legate a sostanze odorigene e polveri legate alla fase di conferimento dei rifiuti alle operazioni di triturazione dei rifiuti ligno-cellulosici e alle emissioni provenienti dai biofiltri.

Per quanto riguarda la fase di conferimento i mezzi in entrata all'impianto che trasportano il rifiuto all'impianto vengono lavati all'interno dell'impianto e di conseguenza non rilasciano odori nel tragitto per il conferimento dei rifiuti.

Inoltre, il sistema di trattamento dell'aria di ricambio interna e l'utilizzo di *scrubber* e biofiltri permette l'assorbimento e l'ossidazione biologica dei composti chimici dal flusso dell'aria.

Ambiente idrico: Gli impatti potenziali dei corpi superficiali e delle falde derivano dall'inquinamento, dal percolato e delle acque di dilavamento dei piazzali che possono trasportare eventuali sostanze inquinanti.

Al fine di ridurre al minimo gli impatti negativi sull'ambiente e di salvaguardare il più possibile le acque superficiali e di falda, i liquidi di processo, insieme alla condensa del locale di compostaggio e dall'impianto di trattamento aria, sono inviati al riutilizzo (previo trattamento di depurazione). In fase di compostaggio il percolato prodotto verrà nebulizzato sui cumuli in maturazione al fine di agevolare il processo di digestione aerobica.

A maggior garanzia di contenimento delle sostanze inquinanti, sono previsti due serbatoi di accumulo da 50 m³ ciascuno, che permettono periodicamente di mandare a depurazione esterna ogni 20 giorni i liquidi in uscita dall'impianto di disidratazione delle acque di processo.

Per quanto riguarda le acque di prima pioggia il progetto prevede lo stoccaggio in una vasca di accumulo, da dove poi vengono trattate e riutilizzate nel ciclo produttivo e per l'irrigazione delle aree a verde e lavaggio dei piazzali.

Per quanto riguarda le acque sotterranee, non si evidenziano fattori di impatto significativo, essendo le aree di deposito coperte e pavimentate; i serbatoi di stoccaggio dei liquidi di processo avranno tutti gli accorgimenti tecnico-progettuali per evitare fessurazioni. Inoltre, i sistemi di controllo consentiranno di riconoscere eventuali anomalie degli impianti con intervento immediato degli operatori. I consumi idrici per il processo sono modesti in quanto per l'umidificazione dei rifiuti in digestione si riutilizzerà il percolato, le acque di prima pioggia e di seconda pioggia. Altri utilizzi di acqua sono previsti per il reintegro dello scrubber a umido a monte del biofiltro, e per l'umidificazione del biofiltro.

Per quanto possibile, in generale viene massimizzato il riutilizzo di acque di seconda pioggia. Le acque di processo anziché essere mandate a depurazione esterna sono trattate con un sistema del *tipo chimico - fisico* attraverso il quale vengono chiarificate le acque ed avviate alle vasche interrate per essere all'occorrenza riutilizzate per approvvigionare il processo di digestione anaerobica. I fanghi in uscita dalla fase di trattamento chimico fisico vengono inviati a depurazione esterna.

Suolo e sottosuolo: Dal punto di vista geomorfologico e idrogeologico non vi sono impatti, mentre per quanto riguarda il rischio idraulico si stima un impatto negativo modesto, in quanto la superficie impermeabilizzata presente non va ad interferire con la situazione idraulica della zona.

Vegetazione, flora e fauna ed ecosistemi: L'area non è interessata da siti naturalistici di interesse, ed è caratterizzata da vegetazione spontanea. Gli effetti sulla vegetazione sono riconducibili alle emissioni di gas e polveri. Essendo queste ridotte, si ritengono trascurabili gli impatti sulla vegetazione. Per la fauna non si prevede perdita di habitat e di spazio disponibile. L'aumento di traffico e l'esercizio dell'impianto genera un impatto negativo modesto sulla fauna presente, in particolare a causa della variazione dei livelli di rumore.

Livelli sonori: Secondo una valutazione delle emissioni sonore relative agli impianti si verifica che l'impianto rispetta i livelli di emissione e di immissione ai ricettori sensibili, anche grazie a *schermi acustici* nell'intorno delle aree ove sono utilizzate apparecchiature con un livello di potenza sonora ragguardevole (ad esempio il tritratore).

I cogeneratori sono collocati all'interno di una struttura fonoassorbente che ne riduce drasticamente le emissioni sonore e sono dotati di silenziatori sia nei condotti di emissione dei flussi gassosi esausti, sia nelle eventuali aperture laterali della struttura fonoassorbente per l'ingresso di aria comburente e per l'uscita dell'aria di ricircolo.

Per la fase di conferimento rifiuti si stima un impatto negativo modesto generato dal traffico in ingresso e uscita.

Traffico: In fase di esercizio all'impianto confluiranno gli automezzi di raccolta e trasporto della FORSU.

In uscita, oltre agli stessi autocompattatori vuoti, ci saranno i mezzi adibiti al trasporto delle frazioni organiche compostate, destinate alla commercializzazione, e le frazioni da destinare allo smaltimento in discarica.

I flussi veicolari previsti durante il normale esercizio dell'impianto sono modesti, in considerazione del traffico della zona.

Sotto il profilo costi-benefici, per quanto riguarda l'aspetto economico, non si può non evidenziare l'impatto positivo significativo legato alla riduzione del costo di trasporto, comportando una riduzione della tariffa finale di smaltimento.

Energia: L'impianto genera un impatto positivo rilevante in quanto attraverso la cogenerazione a biogas, prodotto dalla digestione anaerobica dei rifiuti umidi, si genera energia elettrica rinnovabile in quantità tale da poter essere utilizzata in parte per gli auto consumi ed in parte per immetterla in rete.

Rifiuti: In termini di smaltimento di rifiuti si stima un impatto positivo in quanto il rifiuto umido dei comuni conferenti, tra cui il comune di Molfetta tra i maggiori, potrà essere trattato in un impianto baricentrico rispetto alla produzione, con una riduzione economica per il trattamento.

L'impianto inoltre produrrà compost che potrà essere suddiviso in una parte distribuita ai comuni conferitori come ammendante per la sistemazione delle aree verdi, e la restante come compost fuori specifica che sarà inviato a discarica come materiale di copertura.

I rifiuti prodotti dalle lavorazioni all'interno dell'impianto sono i seguenti :

- *scarti di sopravaglio* provenienti dalla raffinazione finale del compost smaltiti presso la discarica di servizio
- *compost fuori specifica*, che sarà smaltito e/o riutilizzato come terreno di ricopertura in discarica;
- *acque di prima pioggia e percolato* in eccesso, che saranno smaltiti presso impianti autorizzati;
- *fango in uscita dalla fase di trattamento chimico fisico*, da avviare a smaltimento;
- *oli dei motori e dei mezzi*, che saranno stoccati in contenitori specifici e conferiti ad impianti specializzati e/o conferiti al consorzio obbligatorio.

Tali rifiuti non saranno prodotti in quantità elevata e di conseguenza generano un impatto trascurabile.

Pubblica utilità: La realizzazione di tale impianto genera un impatto positivo rilevante in quanto permette l'autosufficienza dei comuni conferitori nello smaltimento dei rifiuti, ed inoltre risponde anche alla necessità della prossimità dell'impianto agli stessi. La realizzazione di questo impianto permette, infatti, di ridurre notevolmente il tragitto per il conferimento dei rifiuti presso l'impianto di recupero.

3.3 Gestione e manutenzione

Le attività di gestione dei rifiuti che si svolgeranno nell'impianto sono di pubblico interesse.

Esse dovranno svolgersi nell'osservanza delle norme vigenti applicabili, della miglior regola d'arte e dei seguenti principi generali:

- evitare ogni danno e pericolo alla salute, alla sicurezza ed al benessere della collettività
- garantire il rispetto delle esigenze igienico sanitarie
- evitare ogni rischio di inquinamento dell'aria, dell'acqua, del suolo e del sottosuolo
- evitare la dispersione di odori molesti
- evitare la produzione di rumori entro i limiti tipici delle zone industriali
- cercare costantemente di incrementare il recupero dai rifiuti di materiali riutilizzabili o riciclabili, con ottimizzazioni di processo improntate a criteri di economicità e di efficienza
- rispettare le norme di sicurezza e di igiene sui luoghi di lavoro.

Di seguito si forniscono le notizie ed i riferimenti operativi necessari alla gestione dell'impianto.

Per assicurare una accorta gestione di tutti i **residui solidi** (compost di qualità, compost da rifiuti, scarti organici non completamente compostati, scarti vari non comportabili, sovralli residuanti dai rifiuti urbani indifferenziati) è necessario e sufficiente eseguire con ordine ed in modo completo tutte le diverse fasi del processo di trattamento, evitando in particolare:

- il permanere di rifiuti da trattare nelle zone di scarico;
- l'accumulo di rifiuti trattati in aree diverse da quelle destinate al deposito temporaneo del compost e / o dei rifiuti da avviare a smaltimento in discarica.

Quindi, per assicurare una accorta gestione di tutti i **residui liquidi** (percolati e acque meteoriche) è necessario e sufficiente eseguire con ordine ed in modo completo tutti gli interventi ordinariamente richiesti sulle opere idrauliche ed in particolare :

- la periodica pulizia delle canaline di raccolta e delle griglie carrabili di protezione delle stesse;
- il monitoraggio delle vasche di raccolta destinate a contenere le acque di prima pioggia, con il periodico svuotamento delle stesse a cura di ditta autorizzata al trasporto di rifiuti liquidi (che verranno avviati, evidentemente, a smaltimento).

Il Gestore si farà carico delle necessarie attività di disinfezione, disinfestazione e derattizzazione secondo il programma che verrà stabilito dalla A. S. L.

Disinfestazione: Per limitare efficacemente la proliferazione di insetti sono necessari due tipi di interventi:

- la limitazione (e possibilmente l'eliminazione) delle situazioni che favoriscono tale proliferazione, come gli accumuli incontrollati di rifiuti e di sostanza organica in genere, i ristagni di acqua ecc.
- l'irrorazione delle superfici interessate con prodotti (presidi sanitari) adeguati rispetto all'obiettivo che ci si propone.

La prima tipologia di interventi rimanda ad una corretta gestione del processo e delle aree esterne all'impianto, entrambi argomenti trattati altrove.

La seconda tipologia di interventi prevede fasi differenziate tra cui l'esecuzione di un trattamento "antilarvale".

Derattizzazione: Si deve in primo luogo osservare che ci si può trovare in una ampia varietà di situazioni, che vanno da quelle "fisiologiche" a quelle marcatamente "patologiche". Si deve considerare, infatti, che l'impianto di trattamento si trova in area non urbanizzata, per cui non può essere assunto, come obiettivo delle attività di derattizzazione, quello della eliminazione di una specie naturalmente presente nell'habitat. Deve essere, invece, considerata "patologica", in quanto innaturale, e quindi da contrastare con energia, la presenza di specie che possono raggiungere dimensioni considerevoli, potenzialmente pericolosi per la salute umana.

In conseguenza di quanto sopra, gli interventi di derattizzazione consisteranno in attività di monitoraggio e verifica e attività di derattizzazione in senso stretto.

Le prime, da ripetersi annualmente, sono mirate ad identificare la popolazione eventualmente presente nelle aree circostanti l'impianto e si svolgeranno mediante posizionamento di trappole.

Nel caso in cui si riscontri la presenza di specie indesiderabili, si procederà al sistematico posizionamento di esche in luoghi di probabile passaggio dei roditori, per poi procedere alla verifica dell'efficacia dell'intervento.

Monitoraggio ambientale: Il Gestore è tenuto a predisporre e tenere in funzione, a sua cura e spese, una stazione di rilevamento dei seguenti parametri meteorologici: direzione ed intensità del vento; quantità di pioggia; temperatura e pressione atmosferica.

Il Gestore provvederà altresì al prelievo di campioni di aria nelle immediate vicinanze dell'impianto ed alla relativa analisi chimica per l'individuazione di sostanze odorogene.

In tabella 3.5 vengono sinteticamente riportati i principali vantaggi per quanto attiene alla gestione e manutenzione dell'impianto ad umido rispetto alle previsioni di base della gara di progettazione.

Pretrattamento

Macchinari impiegati	
<p>Due spremiatrici di potenzialità pari a 20 t/ora: ciascuna macchina è formata da una struttura esterna, attraverso la quale viene separata la frazione fluida a mezzo di moto centrifugo, e da un'anima costituita da robusta coclea che spinge lateralmente con moto centrifugo attraverso la cassa forata la frazione fluida. La frazione solida viene invece trasportata verso l'alto grazie al moto ascendente impresso dalla coclea e infine espulsa attraverso una bocca d'uscita. Garantiscono un risultato di separazione pari al 100%, oltre ai ridottissimi interventi manutentivi richiesti ed alle elevate condizioni di sicurezza.</p> <p>Il sistema permette inoltre di uniformare la dimensione delle particelle di materiale da inviare alla fase successiva, le quali devono essere il più minute possibile; questo poiché minori sono le dimensioni, maggiore è la probabilità che la maggior parte del substrato partecipi alle fasi di degradazione anaerobica.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Impiego di un solo operatore per la supervisione del trattamento altamente automatizzato,- Efficacia del processo e scarto inferiore- Interventi manutentivi ridotti
Localizzazione aree ricezione rifiuti e pretrattamento	
<p>Localizzazione del Capannone di ricezione rifiuti in corrispondenza della zona di pretrattamento: si prevede un ampliamento del Capannone A che permetta di effettuare al suo interno sia la fase di ricezione che le operazioni di pretrattamento dei rifiuti in ingresso.</p> <p>Viene ottimizzato il sistema di depurazione dell'aria interna, poiché si evita un eccessivo sviluppo delle tubazioni di aspirazione e mandata collegate con il sistema scrubber / biofiltro.</p> <p>Si riduce, inoltre, la dispersione di odori, materiale solido e liquido nel trasferimento dal primo al secondo Capannone, riducendo notevolmente gli impatti.</p>	<ul style="list-style-type: none">- L'accorpamento dei capannoni determina l'impiego di una solo operatore nella attività di alimentazione materiale, oltre che la riduzione dei tempi nelle fasi di movimentazione- La riduzione delle tubazioni di aspirazione e mandata implica operazioni di manutenzione di durata inferiore,- Rapida pulizia degli scrubber tramite svuotamento corpi filtranti e successiva sostituzione.

Pulizia dei mezzi gommati in ingresso	
Al termine delle operazioni di conferimento dei rifiuti, è prevista l'installazione di un sistema di lavaggio dei mezzi gommati al fine di ridurre lo spandimento di materiali inquinanti nella rete viaria dell'impianto.	<ul style="list-style-type: none"> - Il sistema automatico di lavaggio riduce la presenza di operatori - Garantisce condizioni di salubrità e pulizia - Riduzione dei tempi di pulizia della rete viaria

Digestore anaerobico

Sistema di riscaldamento del substrato	
<p>Il riscaldamento della massa liquida all'interno del digestore, comporterebbe un eccessivo consumo di energia, con conseguente necessità di approvvigionamento dalla rete pubblica oltre che dall'energia elettrica e termica prodotta in cogenerazione.</p> <p>Si prevede pertanto il riscaldamento del substrato prima dell'immissione all'interno del reattore, le cui perdite di calore, realizzando un opportuno sistema di coibentazione, si attestano intorno al 5 – 10 % nei periodi più freddi; si prevede, in particolare, il riscaldamento dell'acqua di processo che alimenterà le vasche di precarica, sfruttando il calore prodotto dalla cogenerazione del biogas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo di energia inferiore - Temperature più basse implicano condizioni operative meno gravose e conseguenti manutenzioni periodiche a frequenza ridotta
Sistema di alimentazione delle acque di processo	
<p>La portata d'acqua necessaria per garantire che il substrato in ingresso raggiunga il valore dell' 8% di sostanza secca è di 154'000 kg/g.</p> <p>Poiché l'approvvigionamento dalla rete pubblica comporterebbe un costo che renderebbe non sostenibile il processo di digestione anaerobica, è stata inserita un sistema di disidratazione del digestato in uscita dalla fermentazione anaerobica, per mezzo di centrifuga.</p> <p>Questo sistema permette di riciclare il 70% delle acque di processo provenienti dalle fasi di disidratazione del digestato e dalla depurazione del 30% dei liquidi in uscita dalla centrifuga e delle acque di pioggia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione della portata d'acqua dalla rete pubblica - Sistema automatico di recupero delle acque - Personale operativo legato ad attività di sola supervisione - Riduzione dell'attività di smaltimento dell'acqua di immissione

<p>Questa soluzione, oltre a ridurre i costi di acquisto di acqua dalla rete, permette di abbattere gli impatti dovuti all'immissione ed al successivo smaltimento della portata d'acqua di alimentazione; garantisce inoltre l'invio alla fase di compostaggio di materiale al 30 – 35 % di sostanza secca, migliore rispetto al digestato tal quale, che viene estratto dal digestore allo stato liquido.</p>	
<p align="center">Geometria del digestore anaerobico</p>	
<p>Dimensioni del digestore anaerobico secondo i miglioramenti introdotti: <i>diametro = 28 m; altezza netta = 11,40 m</i> <i>profondità di interrimento = 0 m</i></p> <p>La riduzione di altezza permessa dall'aumento del diametro migliora l'efficienza del sistema di insufflazione, poiché riduce il livello idrico all'interno della vasca e facilita l'immissione di biogas sul fondo.</p> <p>Il fondo del digestore è stato sagomato secondo uno schema a doppia pendenza (esterna = 28%; interna = 56%), che permette di ottenere i vantaggi descritti in precedenza.</p> <p>E' previsto, inoltre, un opportuno sistema di coibentazione delle pareti, affinché le perdite di calore non superino il 5 – 10 % del calore totale.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione del tempo necessario al processo di pulizia del fondo della vasca - Riduzione dei rischi derivanti dalla sedimentazione - Facilità di pulizia dei singoli pozzetti laterali
<p align="center">Sistema di stoccaggio del biogas</p>	
<p>Utilizzo di un sistema di stoccaggio del biogas tramite una cupola a doppia membrana che garantisce i vantaggi descritti in precedenza.</p> <p>Il sistema è formato da due membrane ancorate sul bordo vasca.</p> <p>Sotto la camera del gas viene posizionata una struttura di cavi e reti in materiale plastico sostenuti da un palo centrale in acciaio; questa struttura impedisce il contatto diretto della membrana del gas con i liquami, l'interferenza con i diffusori di biogas ancorati sul fondo e svolge un importante supporto per i batteri desolforanti. E' presente inoltre una valvola di sicurezza anti-depressione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ridotti tempi di manutenzione - Uso di materiali plastici ad alta resistenza alla corrosione - Facilità di accesso ed ispezione - Riduzione del personale di manutenzione - Possibilità di smontaggio e rimontaggio rapido per operazioni di manutenzione straordinaria o ispezione; - Possibilità di sostituzione di ogni singola membrana in caso di deterioramento; - Velocità di realizzazione

Gestione delle portate liquide	
Inserimento di opportuni serbatoi di compenso e accumulo. Serbatoio del volume di 100 m ³ fra la centrifuga e l'impianto di depurazione.	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione dei tempi di carico e scarico - Possibilità di avere punti di stoccaggio temporaneo in caso di fermo impianto.
Gestione acque di processo e di pioggia	
Ubicazione dell'impianto di trattamento delle acque di pioggia nella zona nord e collegamento con le aree di depurazione e con le vasche di raccolta interrate. Realizzazione di un impianto chimico – fisico per il trattamento delle acque di pioggia e di parte delle acque di processo, estratte dalla fase di disidratazione del digestato.	<ul style="list-style-type: none"> - La portata di acqua depurata non compromette il funzionamento della macchina - Riduzione della dipendenza in fase di approvvigionamento idrico dalla rete pubblica

Cogeneratore

Torcia di combustione biogas	
Installazione di una torcia a fiamma ritenuta che consente la combustione del biogas in condizioni di emergenza.	<ul style="list-style-type: none"> - Elevato livello di sicurezza per via del totale contenimento della fiamma
Impianto di cogenerazione da biogas	
Installazione di due motori.	<ul style="list-style-type: none"> - Maggiore flessibilità, poiché l'uso di due motori permette di coprire eventuali manutenzioni di una delle due unità - Riduzione del personale manutentivo - Possibilità di intervento su di un gruppo in "ombra" al secondo, evitando il fermo impianto

Compostaggio

Trattamento di compostaggio	
<p>Miglioramento del sistema di alimentazione alla fase di compostaggio, frapponendo tra la fase di digestione anaerobica e quella aerobica un sistema di disidratazione che permette di passare ad un tenore di sostanza secca del 30%. In questo modo si garantisce la porosità del substrato al 35% e si riducono notevolmente i consumi di energia necessaria per insufflare aria calda.</p> <p>E' prevista inoltre la realizzazione di 2 setti di separazione in c.a. per differenziare le corsie di maturazione in 4 comparti stagni, tali da rendere facilmente distinguibili e gestibili i cumuli in coltivazione.</p> <p>Per la vagliatura, si utilizza un vaglio rotante con porte d'ispezione insonorizzate che riducono notevolmente gli impatti acustici.</p> <p>Per la sicurezza, l'unità di comando è equipaggiata con un sistema d'allarme e di protezione che disinserisce il motore in caso di interruzioni accidentali .</p> <p>Per abbattere le polveri e le sostanze azotate ed ammoniacali in eccesso sono previsti scrubber a monte dei biofiltri.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione del consumo di energia - Riduzione emissioni gassose - Migliorato controllo e gestione cumuli in coltivazione - Minori costi per il mantenimento degli standard di sicurezza - Protezione automatica da eventuali interruzioni di corrente - Uso di materiali fonoassorbenti - Facilità nella attività manutentive dei dispositivi di filtrazione (scrubber)

Tabella 3.5 Vantaggi della gestione e manutenzione dell'impianto ad umido rispetto alle previsioni di base della gara di progettazione

Le attività di gestione dei rifiuti che si svolgeranno nell'impianto sono di pubblico interesse. Esse dovranno svolgersi nell'osservanza delle norme vigenti e in particolare dei seguenti principi generali:

- deve esser evitato ogni danno e pericolo alla salute, all'incolumità, al benessere ed alla sicurezza della collettività e dei singoli;
- deve essere garantito il rispetto delle esigenze igienico sanitarie ed evitato ogni rischio di inquinamento dell'aria, dell'acqua, del suolo e del sottosuolo, nonché ogni dispersione di odori molesti e la produzione di rumori;
- devono essere costantemente ricercate, con l'osservanza di criteri di economicità e di efficienza, ottimizzazioni di processo rivolte ad incrementare il recupero dai rifiuti di materiali riutilizzabili o riciclabili;
- devono essere sempre rispettate le norme di sicurezza e di igiene sui luoghi di lavoro.

Il Gestore è tenuto a tenere costantemente informate le Pubbliche Amministrazioni interessate, del regolare andamento della gestione nonché delle eventuali situazioni anomale che si dovessero verificare.

Il Gestore deve assicurare che tutti i presidi igienici sanitari presenti nell'impianto siano mantenuti in perfetta efficienza e fornirà al personale utilizzato nell'impianto tutti i necessari dispositivi di protezione.

Il lavaggio degli impianti verrà eseguito: quanto alle parti esterne ed accessibili, secondo necessità e comunque almeno settimanalmente; quanto alle parti interne e meno accessibili, in fase di manutenzione straordinaria, secondo i programmi di attività dell'impianto.

a) Gestione operativa: Per "gestione operativa" si intendono le diverse problematiche di contenuto tecnico – pratico, concernenti l'attività dell'impianto ed in particolare il processo biologico cui i rifiuti vengono sottoposti.

Per "situazioni ordinarie" si intendono tutte le situazioni nelle quali non esistano anomalie che possano avere influenza sulla gestione operativa.

Tali anomalie (che nei casi di maggiore gravità prendono il nome di "emergenze"), possono riguardare: il personale (assenze impreviste, infortuni sul lavoro, ecc.); le macchine operatrici (problemi di funzionalità, avarie, ecc.); le strutture civili, comprese le aree esterne; gli impianti civili (elettrico, di riscaldamento, idraulico ecc.); le macchine e gli impianti di processo (aprisacco, ventilatori, impianto elettrico, ecc.).

L'attività gestionale dell'impianto deve essere organizzata tenendo conto della tipologia dei rifiuti che dovranno essere trattati e delle caratteristiche del metodo di trattamento.

All'impianto potranno essere conferiti esclusivamente:

- rifiuti solidi urbani misti, residuali dalle attività di raccolta differenziata;
- rifiuti solidi urbani provenienti dalla raccolta differenziata della frazione organica;
- rifiuti speciali non pericolosi assimilati agli urbani;
- rifiuti ammessi alla produzione di compost con l'applicazione di procedure semplificate;
- rifiuti compostabili non pericolosi.

Eventuali ampliamenti delle categorie di rifiuti ammesse all'impianto dovranno essere autorizzati dalla Provincia. I rifiuti conferiti all'impianto dovranno, in ogni caso, essere privi di rifiuti ingombranti, beni durevoli, rifiuti pericolosi.

La gestione operativa comprende l'esecuzione di controlli di processo, oltre che sui rifiuti in ingresso e sui prodotti ottenuti al termine del processo. I controlli sistematici devono essere effettuati su tutti i carichi in arrivo e consistono nell'ispezione visiva dei rifiuti

I controlli di processo, durante tutte le fasi dell'attività di gestione dei rifiuti, sono finalizzati a

verificare il corretto procedere dei fenomeni ossidativi, identificare tempestivamente eventuali anomalie e apportare in tempo utile i correttivi necessari.

La tipologia di processo adottata nell'impianto richiede il controllo dei seguenti parametri:

temperatura, umidità, tenore di ossigeno e pH (limitatamente alla produzione di compost di qualità).

Il Gestore dovrà provvedere alla identificazione di ciascun cumulo di rifiuti, registrandone le dimensioni, la tipologia dei rifiuti utilizzati e l'eventuale miscelazione di diverse matrici.

Le “*situazioni anomale o non ordinarie*” vengono convenzionalmente suddivise in:

- *anomalie operative*, ovvero inconvenienti di limitata rilevanza, che possono essere fronteggiati dal personale dell'impianto senza l'ausilio di personale esterno;
- *le emergenze*, ovvero situazioni di elevata gravità, che non possono essere fronteggiate dal solo personale dell'impianto, e che richiedono l'intervento di organizzazioni esterne specializzate (Pronto Soccorso, Vigili del Fuoco, Protezione Civile ecc.).

In presenza di “situazioni non ordinarie”, gli obiettivi da conseguire sono: l'eliminazione di rischi per le persone, l'eliminazione di rischi per le cose e il ritorno alla “situazione ordinaria”.

Le “*anomalie operative*”, sono le seguenti :

- incidente sul lavoro di lieve entità;
- mancanza di energia elettromotrice;
- malfunzionamento di macchine operatrici, o di impianti di trattamento, o di impianti civili;
- affollamento e / o comportamento indisciplinato da parte di conferitori.

Il Preposto provvederà alle misure di primo intervento caso per caso necessarie (quali ad esempio : medicazione all'interno del locale adibito ad infermeria; predisposizione di sacchetti di sabbia per evitare allagamenti; collegamento di generatori di emergenza; esame principali indicatori di stato delle macchine operatrici; collegamento della macchina a batterie ausiliarie in caso di difficoltà all'avviamento; rilevazione e monitoraggio delle anomalie degli impianti di trattamento e/o civili con conseguente informazione al direttore tecnico; informazione dei conferitori circa la presumibile durata dell'attesa conseguente ad un anomalo affollamento).

b) Gestione delle emergenze: In relazione all'attività tipica dell'impianto ed alla collocazione geografica dello stesso, le “emergenze” da affrontare sono le seguenti :

- *incidente sul lavoro di rilevante entità;*
- *situazioni possibili a seguito di precipitazioni eccezionali;*
- *malfunzionamento generale dell'impianto elettrico;*
- *incendio.*

In attesa dell'intervento delle Organizzazioni competenti il Preposto provvederà ad attuare le misure di primo intervento necessarie per il caso specifico, tra cui:

- *primo soccorso* in caso di incidente sul lavoro con allontanamento da locali invasi da fumo o da sorgenti di forza elettromotrice, massaggio cardiaco, ecc.;

- *distacco dell'alimentazione elettrica* (in caso esista la possibilità di danni alla rete elettrica, con conseguente pericolo per le persone, oppure nel caso in cui un danno verificatosi in una sezione dell'impianto possa provocare ulteriori danni in altre sezioni dello stesso);
- *spostamento delle macchine operatrici* in posizione tale da poter agevolmente procedere alla loro messa in moto al cessare delle avverse condizioni atmosferiche; messa in preallarme dei servizi di emergenza;
- allontanamento delle persone eventualmente prossime al focolaio ed utilizzo degli estintori di primo intervento.

c) Controlli analitici sui rifiuti in ingresso: Periodicamente, sulle diverse tipologie di rifiuti conferiti dai diversi produttori, vengono eseguiti, a campione, dei controlli analitici di caratterizzazione chimica.

Con riferimento ai *rifiuti solidi urbani misti*, i controlli a campione devono essere finalizzati ad accertare l'assenza di rifiuti non compatibili con i trattamenti (meccanici e biologici) eseguiti nell'impianto (ad esempio: rifiuti provenienti da attività artigianali o industriali).

Con riferimento ai *rifiuti organici selezionati*, provenienti da raccolta differenziata di rifiuti solidi urbani, i Controlli a Campione devono essere finalizzati ad accertare la compatibilità dei rifiuti rispetto alla produzione di compost di qualità. Pertanto dovranno essere determinati:

- il pH e l'umidità dei rifiuti;
- la presenza di materiali indesiderabili (plastica, metalli) o di inerti (lapidei, polveri);
- la presenza di metalli pesanti (Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn, As, Se, B);
- altri parametri significativi (tensioattivi, fenoli volatili, salinità ecc)

Il Gestore, nella stesura dei rapporti periodici, dovrà rilevare le correlazioni tra rifiuti in ingresso e caratteristiche qualitative del compost e, se del caso, proporre alla Provincia ed alla A.S.L. di assumere gli opportuni provvedimenti. In ogni caso il gestore avrà facoltà di sospendere l'accettazione dei rifiuti per i quali vi sia evidenza di incompatibilità con la produzione di compost di qualità.

A processo concluso il Gestore dovrà eseguire i controlli necessari ad assicurare il conseguimento degli obiettivi del processo medesimo.

d) Controlli sul processo di compostaggio: Il sistema di controllo automatico del processo di trattamento dovrà consentire la gestione di tutti i parametri rilevanti per lo svolgimento delle diverse fasi di bio-ossidazione : *temperatura; ossigeno; umidità; pH (per la produzione di compost di qualità)*.

Conseguentemente le verifiche operative di processo, effettuate con frequenza diversa a seconda dell'esito dei controlli, devono accertare che non vi siano anomalie di funzionamento nel sistema.

e) Controlli sulla produzione di biogas: Il controllo consiste nella verifica qualitativa del biogas prodotto dalla sezione di digestione anaerobica.

f) Piano generale delle manutenzioni: Il Gestore è tenuto ad eseguire le verifiche periodiche richieste dai libretti di uso e manutenzione di tutte le macchine ed impianti ed a garantire il perfetto funzionamento delle stesse, in modo da prevenire inconvenienti nello svolgimento del servizio. Il Gestore avrà l'onere di monitorare costantemente lo stato delle strutture, degli impianti, delle macchine operatrici e delle attrezzature utilizzate nel processo e, se necessario, di aggiornare il programma di manutenzione preventiva, comunicando per tempo gli interventi necessari che dovranno essere programmati in modo da ridurre al minimo e se possibile evitare le interferenze con l'attività di gestione dei rifiuti.

Per la manutenzione ordinaria dell'impianto il Gestore predisporrà un programma di manutenzione preventiva che sarà di volta in volta integrato dagli interventi occasionali e straordinari che si renderanno necessari. Il piano delle manutenzioni riguarda : le aree esterne; le strutture e gli impianti civili; l'impianto di trattamento; le macchine operatrici e le attrezzature; l'impianto di produzione biogas e cogeneratore; l'impianto di compostaggio.

3.4 Piano economico finanziario, computo metrico estimativo e business plan

3.4.1 Analisi dei costi di gestione impianto di digestione anaerobica ad umido

Caratteristiche tecniche dell'impianto

Quantità conferita ----->	29. 000 ton/anno
FORSU raccolta alla fonte (scarti 5%) ----->	14.600 ton/anno
FORSU da raccolta domestica (scarti 5%) ----->	14.600 ton/anno
Energia elettrica prodotta ----->	7.589.774 Kwh/anno
Energia termica prodotta ----->	4.602.112 Kwh/anno
Fabbisogno di energia termica ----->	930.020 Kwh/anno
Surplus di energia termica ----->	3. 666.486 Kwh/anno

Composizione dell'impianto

L'impianto è composto dalle seguenti sezioni:

- sezione ricezione e stoccaggio;
- sezione pretrattamento meccanico;
- sezione digestione anaerobica;
- sezione cogenerazione e trattamento biogas;
- sezione trattamento del digestato;
- sezione compostaggio.

Sono integrati i seguenti sistemi ausiliari:

- sala controllo e automazione;
- impianti elettrici;
- reti ausiliarie;
- reti di collegamento acque di processo.

Analisi dei costi di gestione

In questo paragrafo si descrivono analiticamente i costi relativi alla gestione dell'impianto proposto e vengono analizzati in ordine alle varie classi di costo.

Personale: Il calcolo dei costi relativi al personale viene eseguito sull'esercizio dell'impianto tenendo conto delle figure necessarie.

PERSONALE	N°	COSTO ANNUO	TOTALE COSTI ANNUI
Unità specializzate	3	€ 42.000,00	€ 126.000,00
Unità operative	6	€ 32.000,00	€ 192.000,00
Totale personale	9		€ 318.000,00

Manutenzioni: Per la stima dei costi di manutenzione saranno stimati quelli relativi alle manutenzioni ordinarie e alle manutenzioni straordinarie previste.

- *Manutenzione Ordinaria:* E' rappresentata da quelle attività manutentive semplici, a cura del personale addetto alla gestione, che hanno lo scopo di preservare nel tempo macchine ed impianti.
- *Manutenzione Straordinaria:* E' rappresentata da attività specifiche differenti da quelle previste per la manutenzione ordinaria ed è eseguita da personale specializzato dotato di conoscenza specifiche, documentazione e ricambi.

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE PRETRATTAMENTO	VALORE IN €/ANNO
1	Trituratore aprisacchi	9.200,00
2	Nastro trasportatore	1.600,00
3	Vaglio rotante	4.200,00
4	Nastri trasportatori in gomma	2.000,00
5	Spremitrici	15.000,00
6	Coclea	600,00
7	Pompa sollevamento purea	1000,00
8	Cassoni	300,00
9	Biofiltro	2000,00
10	Ventilatore	1000,00
11	Scrubber	2200,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE PRETRATTAMENTO		39.100,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE DIGESTIONE ANAEROBICA	VALORE IN €/ANNO
1	Vasche di precarica	2.600,00
2	Scambiatori di calore	1.200,00
3	Digestione anaerobico	15.000,00
4	Copertura	2.000,00
5	Ricircolo biogas	600,00
6	Sistemi di sicurezza	1.500,00
7	Impianto di depurazione biogas	2.000,00
8	Torcia	600,00
9	Motori cogenerazione	12.000,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE DIGESTIONE ANAEROBICA		37.500,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE SEZIONE TRATTAMENTO REFLUI	VALORE IN €/ANNO
1	Centrifuga	4.200,00
2	Impianto di depurazione	2.700,00
3	Pompe di ricircolo	1.500,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE TRATTAMENTO REFLUI		8.400,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE COMPOSTAGGIO	VALORE IN €/ANNO
1	Biofiltro	3.600,00
2	Scrubber	4.200,00
3	Impianto di insufflazione aria	1.300,00
4	Vaglio rotante	3.200,00
5	Pala meccanica	4.500,00
6	Ventilatori	1.200,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE COMPOSTAGGIO		18.000,00

RIEPILOGO COSTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA ANNUA		VALORE IN €
Pos.	SEZIONE	
1	Impianto di trattamento	39.100,00
2	Impianto di digestione anaerobica	37.500,00
3	Impianto di trattamento reflui	8.400,00
4	Impianto di compostaggio	18.000,00
5	Impianti vari	20.000,00
TOTALE MANUTENZIONE STRAORDINARIA		123.000,00

Il costo totale anno per manutenzioni straordinarie sarà pari a € 123.000,00.

Energia elettrica: In riferimento ai consumi di energia elettrica si fa riferimento allo schema funzionale riportato di seguito.

SEZIONE	POTENZA INSTALLATA	COEFF. FUNZIONALITA'	h/gg	kW/ gg	gg/anno	kW/anno
Pretrattam.to	260	0.55	4	572	330	188.760
Digestione anaerobica	37	0.50	24	444	330	146.520
Trattamento reflui	90	0.64	24	1382	330	456.060
Compostaggio	220	0.52	24	2745	330	905.850
TOTALE CONSUMI ENERGIA ELETTRICA				5.14	330	1.697.190

Il consumo annuo totale sarà pari a 1697.19 MW/ anno .

Il costo stimato dell'energia, benché prodotta dall'impianto sarà pari a:
 $1697190 \times 0.12 \text{ €/kW} = 203.662,80 \text{ €/anno}$.

Consumo combustibili: I consumi di combustibili sono essenzialmente legati alle macchine operatrici impiegate per l'alimentazione alla sezione di pretrattamento, nonché alla gestione e movimentazione dei cumuli per l'impianto di compostaggio e l'allontanamento dei cassoni scarrabili.

CONSUMO COMBUSTIBILI						
Macchine operatrici	N.	Lt/h	h/gg	gg/anno	€/lt	€/anno
Pala gommata	1	12	4	330	1,70	26.928,00
Autocarro	1	6	2	330	1,70	6.732,00
TOTALE CONSUMO COMBUSTIBILI						33.660,00

Materiali di consumo

MATERIALI DI CONSUMO E RICAMBI	€/anno
Ricambi usura	60.000,00
Materiali di consumo	30.000,00
Varie	20.000,00
TOTALE MATERIALI DI CONSUMO E RICAMBI	110.000,00

Analisi dei costi di disinfestazione e disinfezione

Viene stimato un costo annuo per i servizi di disinfestazione per € 9.000,00.

Costi di smaltimento: Vengono analizzati i costi di smaltimento dei rifiuti e dei rifiuti prodotti dall'impianto.

RIFIUTI	COSTO ANNUO
– FRAZIONE SECCA 10 t/gg x 330 gg/anno x 120 €/ton	396.000,00
– REFLUI DA SMALTIRE 5 m ³ /gg x 330 gg/anno x 40 €/m ³	66.000,00
TOTALE SMALTIMENTI	462.000,00

Spese tecniche di gestione

- Consulenze tecniche _____ 40. 000,00
- Consulenze sicurezza _____ 12. 000,00
- Consulenze legali _____ 8. 000,00

TOTALE SPESE TECNICHE	60.000,00
------------------------------	------------------

Spese assicurative

- Assicurazioni RG.RCO _____ 8. 000,00
- RC Inquinamento _____ 12. 000,00
- All Risks _____ 15. 000,00

TOTALE SPESE ASSICURATIVE	35.000,00
----------------------------------	------------------

La struttura dei costi di gestione dell'impianto è la seguente:

STRUTTURA DEI COSTI	€/anno
PERSONALE	318.000,00
MANUTENZIONI	123.000,00
COMBUSTIBILI	33.660,00
MATERIALI DI CONSUMO	110.000,00
COSTI DI SMALTIMENTO	462.000,00
SPESE TECNICHE	60.000,00
SPESE ASSICURATIVE	35.000,00
TOTALE COSTI DI GESTIONE	1.141.660,00

Il costo di gestione totale dell'impianto risulta pari a € 1.141.660,00 al netto del costo di energia elettrica poiché l'impianto nasce per produrre E.E. dalla FORSU. In caso contrario, includendo i costi energetici avremo $1.141.660,00 + 203.663,00 = 1.345.323,00$ €/anno. Dall'analisi svolta risulta quindi che il sistema proposto ha un costo gestionale pari a 1.345.323,00 €/anno.

3.4.2 Computo metrico estimativo impianto di digestione anaerobica ad umido

DESIGNAZIONE DEI LAVORI	QUANTITA' (unità)	IMPORTO UNITARIO (euro)	IMPORTO TOTALE (euro)
<i>Movimenti di materia - Opere in verde</i>			
Caricamento e trasporto di materiali terrosi	1,00	25000,00	25000,00
Inerbimento e rinverdimento dell'argine con essenze schermanti	1,00	15000,00	15000,00
<i>Opere edili</i>			
Demolizione di strutture in c.a., trasporto in discarica e smaltimento	65,70	20,09	1319,91
Scavi di fondazione in materiali sciolti e trasporto in discarica	362,10	4,01	1452,02
Scavi di fondazione in roccia e trasporto in discarica	100,50	18,56	1865,28
Rinterri e rilevati	50,40	10,00	504,00
Calcestruzzo magro per fondazione	44,70	86,00	3844,20
Calcestruzzo armato per fondazioni e platee impianto	294,10	96,00	28233,60
Calcestruzzo armato per murature in elevazione	191,35	100,40	19211,54
Fornitura, lavorazione e posa in opera di barre di acciaio	34867,50	1,82	63458,85
Casseforme per getti in cls per platea di fondazione	608,10	20,00	12162,00
Casseforme per getti in cls per opere in elevazione	1147,40	21,00	24095,40
Pavimentazione monolitica costituita da massetto in cls armato	2615,75	35,00	91551,25
Muratura di blocchi cavi in cls	762,80	25,00	19070,00
Lastra trasparente in PMMA a tenuta stagna	118,80	38,40	4561,92
Strutture metalliche di finitura	1347,00	135,00	181845,00
Strutture metalliche per trattamenti primari	65,00	100,00	6500,00
Griglie in acciaio per canaline di raccolta del percolato	36,00	50,00	1800,00
Copertura carrabile di vasche interrato	65,00	100,00	6500,00
Fornitura e posa in opera di canalina forata di insufflazione nella platea di trattamento	800,00	85,00	68000,00
Fornitura e posa in opera di "biomoduli" per pavimentazione areata di biofiltro	120,00	45,60	5472,00
Fornitura e posa in opera collettore di insufflazione per maturazione fango digerito	8,00	5000,00	40000,00
Fornitura e montaggio valvola a sfera per evacuazione percolato dalle canaline di insufflazione	32,00	250,00	8000,00
Ripristino palazzina uffici	1,00	40000,00	40000,00
Realizzazione impianto idraulico-igienico-sanitario della palazzina uffici	1,00	20000,00	20000,00
<i>Macchine e impianti di pretrattamento, digestione anaerobica, utilizzo biogas e generazione energia elettrica</i>			
Macchina rompisacchi per lacerazione dei sacchetti di FORSU	1,00	310000,00	310000,00
Fornitura e posa in opera di nastro trasportatore in gomma	1,00	40000,00	40000,00
Fornitura macchina vagliatrice a tamburo rotante per	1,00	120000,00	120000,00

vagliatura della FORSU			
Separatore idraulico	1,00	120000,00	120000,00
Spremitrice	2,00	260000,00	520000,00
Vasche di precarica della miscela di fango da avviare a fermentazione anaerobica	2,00	95000,00	190000,00
Digestore anaerobico dotato di gasometro a tetto flottante	1,00	740000,00	740000,00
Digestore anaerobico Bekon	0,00	170000,00	0,00
Gasometro esterno di stoccaggio del biogas	0,00	200000,00	0,00
Dispositivi di spillamento, recupero e trattamento del biogas	1,00	130000,00	130000,00
Impianto di cogenerazione per l'impiego di biogas prodotto da digestione anaerobica	1,00	1330000,00	1330000,00
Fornitura e posa in opera dei sistemi accessori necessari per pretrattamenti e digestione anaerobica	1,00	950000,00	950000,00
Impianto di compostaggio			
Fornitura e posa in opera di quadro di comando	1,00	30000,00	30000,00
Fornitura e installazione di quadri di distribuzione alimentazione per utenze elettriche e quadro di comando	2,00	10000,00	20000,00
Sonda per il controllo della temperatura e dell'umidità nel cumulo di rifiuti	16,00	2500,00	40000,00
Fornitura in opera di centralina di trasmissione segnali	8,00	1500,00	12000,00
Fornitura in opera del sistema di irrorazione fango da digestione anaerobica cumuli materiale strutturante	1,00	50000,00	50000,00
Fornitura in opera di ventilatore tipo AR 50/2 AISI 304	10,00	8000,00	80000,00
Fornitura di portoni con dispositivo motorizzato per chiusura e apertura	8,00	4000,00	32000,00
Fornitura e posa in opera di impianto elettro-idraulico per alimentazione del sistema di compostaggio	1,00	45000,00	45000,00
Fornitura e posa in opera di macchina vagliatrice a tamburo rotante per vagliatura di compost e rifiuti secchi	1,00	125000,00	125000,00
Macchine semoventi ed attrezzature			
Fornitura di pala gommata per la movimentazione dei rifiuti	1,00	150000,00	150000,00
Fornitura di autocarro dotato di braccio idraulico per la movimentazione di cassoni scarrabili	1,00	120000,00	120000,00
Fornitura di autocarro per il conferimento della FORSU e del materiale strutturante	1,00	100000,00	100000,00
Fornitura di compressore di potenza superiore a 100kW	1,00	20000,00	20000,00
Fornitura di pompa dotata di motore elettrico di potenza superiore a 10kW	1,00	10000,00	10000,00
Fornitura di cassoni scarrabili in lamiera pressopiegata della capacità di 25mc	3,00	3500,00	10500,00
Fornitura di cassoni scarrabili in lamiera pressopiegata della capacità di 30mc	3,00	4000,00	12000,00
Impianti tecnologici generali			
Fornitura e posa in opera di gruppo di pressurizzazione antincendio	1,00	25000,00	25000,00
Opere elettriche per alimentazione del gruppo di pressurizzazione antincendio	1,00	5000,00	5000,00
Fornitura, scavo e posa in opera di letto di posa in stabilizzato di cava e riempimento cavi di tubazione	550,00	100,00	55000,00
Fornitura e posa in opera di gruppo antincendio (idrante, cassetta, lancia, tubo)	8,00	400,00	3200,00

Fornitura e posa in opera di gruppo antincendio per attacco autopompa (2 coppie di flange e cassetta)	1,00	500,00	500,00
Fornitura e posa in opera di cabina di trasformazione MT/BT	1,00	65000,00	65000,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x70mmq e collegamenti elettrici	600,00	24,04	14424,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x16mmq e collegamenti elettrici	600,00	8,53	5118,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x95mmq e collegamenti elettrici	400,00	31,80	12720,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x120mmq e collegamenti elettrici	360,00	39,00	14040,00
Fornitura e posa in opera di quadro elettrico di distribuzione	5,00	2500,00	12500,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 350A	3,00	3000,00	9000,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 150A	3,00	1200,00	3600,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 200A	3,00	2000,00	6000,00
Fornitura di gruppo elettrogeno a motore endotermico a ciclo diesel	1,00	70000,00	70000,00
Fornitura e posa in opera di gruppo automatico di rifasamento a controllo elettronico	1,00	12000,00	12000,00
Fornitura e posa in opera di rete di terra	2000,00	12,00	24000,00
Realizzazione impianto illuminazione esterno e interno palazzina uffici, capannone pretrattamento e maturazione	1,00	50000,00	50000,00
Fornitura di ventilatore e impianto di aspirazione dei capannoni di ricezione rifiuti e trattamento primario	2,00	40000,00	80000,00
Fornitura di tubazioni di collegamento tra capannoni di ricezione e di pretrattamento	1,00	25000,00	25000,00
Fornitura di ventilatore a servizio del capannone di maturazione accelerata del fango digerito	2,00	60000,00	120000,00
Realizzazione di tubazioni di collegamento tra il capannone di maturazione accelerata ed i ventilatori	1,00	15000,00	15000,00
Lavori vari a corpo			
Adeguamento impianto di raccolta e stoccaggio delle acque meteoriche dei tetti e chiusini	1,00	25000,00	25000,00
Realizzazione impianto di gestione delle acque meteoriche, comprese canalizzazioni e disotturazione delle condotte	1,00	70000,00	70000,00
Adeguamento e integrazione delle pavimentazioni esistenti in cls o conglomerato bituminoso	1,00	50000,00	50000,00
Realizzazione impianti termici e di condizionamento nella palazzina uffici	1,00	20000,00	20000,00
TOTALE (euro)			6788048,97

3.4.3 Business plan impianto di digestione anaerobica ad umido

DESIGNAZIONE DEI LAVORI	IMPORTO (euro)
Movimenti di materia - Opere in verde	40.000,00
Opere edili (fondazioni, strutture metalliche, palazzina uffici)	861.400,00
Macchine e impianti di pretrattamento, digestione anaerobica, utilizzo biogas e generazione energia elettrica e termica	4.450.000,00
Impianto di compostaggio (macchine e impianti)	434.000,00
Macchine semoventi ed attrezzature per movimentazione materiali	422.500,00
Impianti tecnologici generali	627.100,00
Lavori vari a corpo (gestione acque meteoriche, viabilità interna, ...)	165.000,00
TOTALE	7.000.000,00

CALCOLO RATA DI AMMORTAMENTO	
Somma	7.000.000,00
Tasso annuo	4,00%
Anni	15
Rate/anno	1
Tasso periodale	4,00%
Rate totali	15
$q = (1+i)$	1,04
$q^n = (1+i)^n$	1,800943506
Rata	629.587,70
Importo mensile	52.465,64
Tasso annuo eff.	4,0000%

PIANO DI AMMORTAMENTO				
	Rata	Quota interessi	Quota capitale	Debito residuo
	=	=	=	7.000.000,00
1	629.587,70	280.000,00	349.587,70	6.650.412,30
2	629.587,70	266.016,49	363.571,21	6.286.841,09
3	629.587,70	251.473,64	378.114,06	5.908.727,03
4	629.587,70	236.349,08	393.238,62	5.515.488,41
5	629.587,70	220.619,54	408.968,16	5.106.520,25
6	629.587,70	204.260,81	425.326,89	4.681.193,36
7	629.587,70	187.247,73	442.339,97	4.238.853,39
8	629.587,70	169.554,14	460.033,56	3.778.819,83
9	629.587,70	151.152,79	478.434,91	3.300.384,92
10	629.587,70	132.015,40	497.572,30	2.802.812,62
11	629.587,70	112.112,50	517.475,20	2.285.337,42
12	629.587,70	91.413,50	538.174,20	1.747.163,22
13	629.587,70	69.886,53	559.701,17	1.187.462,05
14	629.587,70	47.498,48	582.089,22	605.372,83
15	629.587,70	24.214,91	605.372,79	0,04

COSTI ANNUI (gestionali ed energetici)	IMPORTO (euro)
Costi di gestione	1.141.660,00
Costi energetici	198.681,00

COSTI TOTALI
1.969.928,70

RICAVI ANNUI	PRODUZIONE ANNUA	unità	TARIFFA (euro/unità)	IMPORTO (euro)
Vendita energia elettrica	7.992,00	MWh	178,00	1.422.576,00
Conferimento della FORSU	29.200,00	t/anno	100,00	2.920.000,00

RICAVI TOTALI
4.342.576,00

4. Scelta della tecnologia a secco ed applicazioni reali

4.1 Descrizione generale del progetto a secco

Il primo passo per avviare il lavoro di progettazione e rendere concretamente realizzabile un impianto a secco è stato la valutazione delle diverse alternative tecnologiche presenti sul mercato per la digestione anaerobica della FORSU tipo dry.

Ad oggi le principali ditte specializzate in tali tipi di impianti sono prevalentemente tedesche e francesi, vista la notevole diffusione di tali tecnologie nei paesi del nord Europa; al confronto la scelta in ambito prettamente italiano è molto ridotta. Questa evidenza è legata ovviamente ad una conoscenza ancora limitata dei vantaggi della digestione a secco e al numero ancora minimo di realizzazioni di questo tipo.

Non bisogna dimenticare infatti che l'applicazione della digestione anaerobica alla FORSU nasce dalle conoscenze tecnologiche acquisite negli anni per la depurazione dei reflui civili, e dunque è risultato naturale lo sviluppo della tecnologia ad umido, come "variante" dei manufatti e degli schemi impiantistici già usati in precedenza.

In ogni caso è stato incoraggiante il verificare con mano l'impegno e lo sviluppo sempre più rilevante della ricerca di nuove e vantaggiose soluzioni nel campo della digestione anaerobica a secco anche in ambito italiano, con la nascita di numerose imprese specializzate in tal senso.

Nei paragrafi successivi verranno illustrate le caratteristiche della tecnologia a secco "Waste to energy" (Bekon (2013), Documentazione tecnica online, www.bekon.eu, data ultima consultazione 10/01/2013), sviluppata da Bekon per la digestione anaerobica di biomasse e rifiuti organici e la cogenerazione di energia elettrica e termica, considerata meritevole di interesse e vantaggiosa da molti punti di vista.



Figura 4.1 Reattori di digestione anaerobica a secco Bekon (Bekon (2013))

4.2 Produzione di biogas tramite la fermentazione a secco



Figura 4.2 Modello tridimensionale tipico di un impianto “Waste-to-Energy” (Bekon (2013))

Fino ad oggi la tecnologia del biogas si è principalmente concentrata alla classica “digestione ad umido” di liquami ottenuti da processi agricoli o di rifiuti biologici urbani. Lo svantaggio di questa soluzione sta nel fatto che le materie prime rinnovabili con elevate concentrazioni di sostanza secca o letami solidi possono essere alimentati in modo dosato solo con determinate condizioni.

La cosiddetta “digestione a secco” consente invece una rapida e semplice digestione di biomasse eterogenee – perfino contenenti sostanze “complicate” – sia derivanti dal contesto agricolo che dalla raccolta di rifiuti urbani, senza dispendiosi cicli di riciclaggio o trattamento. Il materiale da sottoporre alla digestione non deve più essere ulteriormente trattato in un substrato liquido pompabile, potendo così realizzare la fermentazione di biomasse con una concentrazione di sostanza secca fino al 50%.

4.3 Il processo di digestione a secco Bekon

Il metodo di digestione a secco Bekon (Bekon (2013)) consente l'utilizzazione di biomasse con una elevata concentrazione di sostanze secche. Come già accennato, questa tecnologia è caratterizzata da una eccellente resistenza ovvero insensibilità nei confronti di sostanze estranee, quali ad esempio sabbia, particelle d'acciaio, pietre, componenti legnose o fibrose.

Non è più richiesta neanche una dispendiosa disidratazione del residuo di digestione alla fine della fase di digestione.

Il processo principale si basa su un inoculo fornito con il materiale già digerito (digestato), mediante un sistema di carico con pala gommata che provvede al carico del digestore (box di digestione).

La biomassa in trattamento viene digerita anaerobicamente mediante un sistema ermetico, in assenza di ossigeno, dove il materiale non viene sottoposto ad alcuna aggiunta né movimentazione per tutta la durata del processo (processo “batch”). Bekon ha ulteriormente sviluppato questo principio batch in un processo monostadio e ottimizzato progressivamente.

Ciò significa concretamente che le diverse reazioni di decomposizione (formazione di idrolisi, acido e metano) si svolgono in maniera controllata e concentrata all'interno di un contenitore di digestione. La biomassa una volta riempita nei digestori permane nello stesso fino alla scadenza del tempo di attesa di circa 4 settimane.

Durante il processo di digestione il materiale in trattamento viene soltanto riscaldato e umidificato, ottenendo così condizioni di vita ottimali per i batteri. Normalmente il processo di digestione avviene nel cosiddetto campo di temperatura mesofilo a circa 38 °C (Bekon (2013)).

Dopo la scadenza del periodo di processo il box di digestione viene scaricato completamente e riempito di nuovo. Successivamente il substrato digerato può essere alimentato in un sistema di compostaggio, dove si ottiene un compost di pregiata qualità, che può essere utilizzato come prezioso concime organico.

Il biogas ricavato durante il processo di digestione, in seguito ad un opportuno processo di depurazione, può essere sfruttato o all'interno di una unità di cogenerazione direttamente per ricavarne energia e calore, oppure alimentato nella rete pubblica del gas dell'azienda energetica locale.

4.3.1 Economicità ed efficienza del processo Bekon

La superiorità della tecnologia Bekon inizia già dalla grande varietà dei substrati che si possono impiegare: biomasse palabili con un'alta percentuale di sostanza secca possono essere convertite in metano senza che sia necessario un laborioso e costoso pretrattamento del materiale da fermentare.

Il principio è semplicissimo: in assenza di aria, i rifiuti biologici, dopo inoculazione con materiale già fermentato, cominciano a fermentare e si forma biogas pregiato.

Il vantaggio della digestione a secco Bekon (Bekon (2013)) è nel fatto che non occorre più una costante miscelazione del materiale. Non sono necessarie pompe né agitatori per alimentare o scaricare il substrato digerato, inoltre il materiale digerato non deve più essere tritato. Con ciò è richiesto un dispendio tecnico-meccanico molto ridotto rispetto agli impianti di digestione ad umido.

All'interno dei digestori non sono dunque installati componenti mobili. Ciò si manifesta positivamente nei costi d'esercizio. L'usura e i costi di manutenzione sono ridotti. Il consumo di energia e il dispendio di manutenzione di un impianto Bekon è chiaramente inferiore a quello di un paragonabile impianto di digestione ad umido. La gestione del processo di digestione a secco consente l'utilizzo di biomasse con una elevata concentrazione di sostanza secca ed è tollerante nei confronti di corpi estranei, quali ad esempio pellicole, pietre, particelle d'acciaio e componenti legnose o fibrose.

4.3.2 Caratteristiche principali della tecnologia Bekon

Il processo di digestione a secco Bekon (Bekon (2013)) consente in maniera ideale una produzione di energia estremamente economica grazie alla sua elevata tolleranza agli impedimenti e per il fatto che vengono meno dispendiosi processi di pretrattamento.

Inoltre sono determinanti anche gli ulteriori vantaggi seguenti:

- modernissimi processi di impianti e di controllo;
- recupero di energia sostenibile a partire da materiali non altrimenti utilizzati;
- tecnologia matura e robusta;
- elevata economicità grazie a evitati costi supplementari;
- ridotti costi di investimento e manutenzione;
- ridotti costi di esercizio e personale;
- elevate rendite di gas;
- elevata qualità del gas;
- elevati standard di sicurezza ed emissione.

4.3.3 Processo “Waste to Energy”

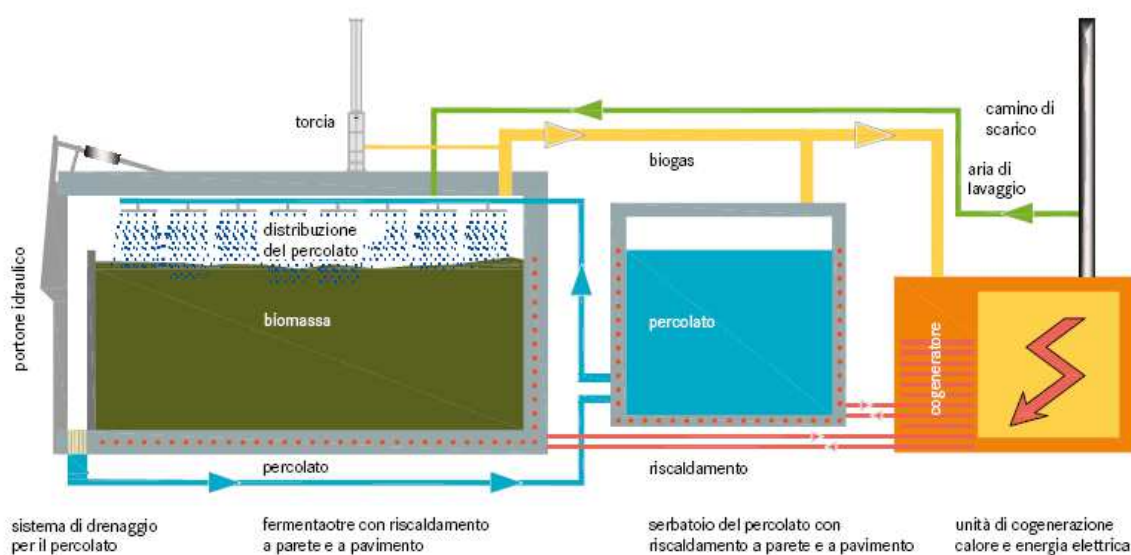


Figura 4.3 Schema di processo del digestore (Bekon (2013))

Questo processo è caratterizzato dalla produzione di energia da biomassa tramite batterie di digestori, ossia contenitori di digestione costruiti a forma di garage. I digestori vengono realizzati a tenuta ermetica al gas e sono movimentati direttamente con pala gommata per le operazioni di svuotamento e di riempimento.

Normalmente si prevede l'assemblaggio di più digestori in blocco da poter utilizzare nell'ambito dell'esercizio Batch differito. Poiché negli impianti di digestione a secco Bekon vengono lavorate biomasse con una elevata concentrazione di sostanza secca, l'impianto complessivo presenta una forma costruttiva compatta.

Grazie alla struttura modulare con parecchi digestori è possibile ampliare in qualsiasi momento l'impianto senza problemi, in particolare per incrementare in futuro le capacità di produzione.

4.3.4 Fornitura del materiale e operazioni di scarico e carico dei box di digestione

I rifiuti biologici vengono raccolti in un capannone di arrivo e quindi convogliati, con un mezzo su ruote, nel fermentatore, di forma simile a un garage. L'inoculazione avviene mescolando materiale fresco a materiale già fermentato.

Prima di iniziare il riempimento dei digestori, il ventilatore di lavaggio del digestore sarà messo in funzione per permettere agli operatori di accedere all'interno in massima sicurezza. Al termine del riempimento vengono inserite le sonde di temperatura, chiusa la porta e dato l'avvio al processo.

Il liquido (percolato) che fuoriesce durante la fermentazione viene raccolto mediante un sistema di drenaggio e inoculato, con un circuito, sul materiale da fermentare con lo scopo di umidificarlo.

La biomassa viene mantenuta a temperatura costante mediante un riscaldamento a parete e a pavimento. In questo modo si raggiungono nel fermentatore condizioni ottimali per la vita dei batteri responsabili della produzione di biogas.

In tutto ciò non è necessario né un ulteriore rimescolamento della biomassa, né l'apporto di materiale aggiuntivo. Dopo il caricamento, il fermentatore viene chiuso con una porta idraulica e inizia il processo di fermentazione della biomassa.

Il materiale fresco da trattare viene posizionato sull'area di manovra in corrispondenza del box di digestione che verrà attivato. L'operazione di inoculo avviene mediante miscelazione tra digestato e materiale fresco, quindi la miscela viene caricata nel box di digestione. La movimentazione dei materiali, le operazioni di svuotamento e riempimento e la miscelazione delle varie frazioni, avvengono tutte con pala gommata (Bekon (2013)).

4.3.5 Sicurezza di lavoro

Al fine di poter escludere con la massima sicurezza la presenza di un'atmosfera esplosiva, i box dei fermentatori subiscono un processo di lavaggio, brevettato Bekon, sia nella fase precedente all'apertura che dopo la chiusura dei portoni di accesso ai box. La miscela così formata, se non utilizzata all'interno dei cogeneratori, viene avviata alla torcia. Per questo per ragioni di continua sicurezza, durante il riempimento/svuotamento, i relativi box dei fermentatori vengono lavati con aria fresca.

Il box di digestione attivo (in fase di carico/scarico) viene continuamente flussato con aria fresca durante il processo di scarico e di carico per motivi di sicurezza.

Un portone di tenuta ai gas, azionato idraulicamente, chiude ermeticamente l'accesso ai box di digestione. La tenuta dei portoni viene garantita da una guarnizione gonfiabile fissata al portone. Una serie di sensori di pressione elettronici garantiscono un continuo monitoraggio della pressione interna della guarnizione e se necessario intervengono correggendo automaticamente i valori di pressione. Eventuali cadute di pressione di importante entità, sono registrate nel sistema di supervisione dell'impianto e attivano specifiche segnalazioni di avvertimento o di allarme.

L'aria di processo estratta dai digestori nelle fasi di carico e scarico viene depurata in biofiltro prima di essere immessa in atmosfera.

Inoltre, negli impianti con tecnologia Bekon (Bekon (2013)) vi sono ulteriori fonti di reflui gassosi da depurare, ossia le strutture di pretrattamento dei rifiuti.

Il biofiltro sarà strutturato in moduli separati, autonomamente funzionanti, tali da poter rimanere in esercizio qualora uno di essi sia fermo per attività di manutenzione.

La componentistica di base del biofiltro sarà la seguente:

- struttura di contenimento realizzata con elementi componibili in c.a. modulari o gettati in opera;
- grigliato di supporto del materiale biofiltrante rimovibile, composto da griglie modulari idonee ad un corretto passaggio a bassa velocità dell'aria ed in grado di garantire una omogenea distribuzione;
- sistema di scarico dei percolati dotato di guardia idraulica con scarico in pozzetto e da questo alla vasca di raccolta percolati;
- letto filtrante con pezzatura 25-120 mm, costituito da una miscela composta di materiale vegetale;
- sistema di umidificazione del letto filtrante regolato dal software di gestione e controllo.

4.3.6 Processo di digestione e gestione dei box di digestione



Figura 4.4 Impianto di digestione a secco, vista portoni digestori (Bekon (2013))

Come sottolineato in precedenza, il materiale in trattamento di digestione anaerobica all'interno dei box di digestione, per tutto il tempo di ritenzione previsto, non viene movimentato né miscelato. Considerato che per la movimentazione del materiale non sono previste pompe, agitatori o altri dispositivi di miscelazione o convogliamento, la tecnologia Bekon è caratterizzata da un livello di tolleranza estremamente elevato nei confronti di corpi estranei eventualmente presenti nel materiale da trattare. Sono particolarmente ridotti gli interventi di manutenzione necessari durante la gestione dell'impianto.

Per accelerare il processo di digestione anaerobica e stimolare una immediata produzione di biogas, subito dopo la chiusura dei portoni, ogni digestore viene sottoposto ad un ciclo di flussaggio/inertizzazione specifico. Questo consente di ottenere elevate rese di produzione ed un biogas di elevata qualità.

I digestori anaerobici a secco messi a punto da Bekon sono contraddistinti da importanti peculiarità che li differenziano da altre soluzioni simili (reattori a modulo parallelepipedo a carico frontale).

I portelloni, come tutta la struttura dei reattori, sono progettati per lavorare con una sovrappressione interna elevata. Questa scelta progettuale permette di lavorare in massima sicurezza anche se si dovesse, per qualunque motivo, verificare una perdita di gas.

I digestori, come detto in precedenza, sono dotati di un sistema di aspirazione dell'aria di processo in grado di creare e mantenere al loro interno condizioni ambientali idonee all'ingresso degli operatori.

I digestori a secco sono costituiti da moduli parallelepipedici aventi le seguenti dimensioni: larghezza utile 8,2 metri, lunghezza utile 28 metri, altezza interna struttura di circa c.a. 5,8 metri. La struttura è realizzata in cemento armato trattato con resine per garantire la tenuta di gas ed integrata con pannelli in materiale isolante per un'elevata coibentazione.

All'interno sono annegati i riscaldatori costituiti da tubi in PE con barriera antiossidante, alimentati ad acqua calda per il riscaldamento della massa.

Il portellone frontale a tenuta di gas è di tipo basculante con apertura verso l'alto, realizzato con la parte interna in acciaio coibentato internamente. La tenuta al gas è garantita da una guarnizione gonfiabile. Il sistema di chiusura si avvale di catenacci pneumatici con blocco di sicurezza, il cui sblocco può essere comandato esclusivamente dal software di gestione.

Per massimizzare il volume utile e nel contempo proteggere il portellone dalla spinta del materiale caricato è prevista una paratia di contenimento apribile che viene chiusa manualmente nelle utili fasi di carico.

Ogni box di digestione è dotato di un sistema di irrorazione del percolato, che consiste in una serie di condotte fissate in alto e dotate di speciali ugelli di distribuzione anti intasamento, sviluppati su progetto Bekon (Bekon (2013)): questo garantisce una omogenea ed efficace distribuzione del percolato su tutta la biomassa in trattamento. Il percolato, prelevato da una vasca di stoccaggio mediante apposita pompa e preventivamente riscaldato mediante scambiatore di calore, viene spruzzato sulla biomassa consentendo una ottimale e costante umidificazione del materiale in digestione (caratteristica fondamentale per poter garantire ottimali rese di produzione di biogas).

Il percolato drenato sul fondo, grazie alla pendenza conferita al pavimento dei reattori, viene raccolto da una canalina posta sul pavimento del box di digestione collegato con un pozzetto di mandata. Dal pozzetto una pompa ad immersione immette il percolato al serbatoio di stoccaggio, quest'ultimo a servizio di più digestori.

Un sistema di controllo provvede alla filtrazione ed alla regolazione della corretta temperatura del percolato prima della sua irrorazione sul materiale in trattamento.

La distribuzione del percolato sulla biomassa ha una duplice funzione: di inoculo microbico e di mantenimento della temperatura mesofila.

Come detto in precedenza, il digestore è inoltre provvisto di un sistema di aerazione forzata che consente l'aspirazione dell'aria all'interno del reattore per aspirare le emissioni gassose maleodoranti nelle fasi di riempimento e di svuotamento.

L'aria aspirata verrà avviata al biofiltro per la purificazione. Ogni reattore è dotato di un sistema di aspirazione autonomo per essere completamente indipendente.

La digestione anaerobica nei reattori anaerobici: I rifiuti organici, opportunamente miscelati con un'aliquota prestabilita di frazione lignocellulosica (legname e scarti vegetali triturati) e di digestato, vengono immessi nel digestore con l'ausilio di una pala meccanica.

Per agevolare lo sviluppo e l'attività batterica la temperatura del materiale a processo viene mantenuta su valori prossimi a 38 °C mediante il riscaldamento del reattore e l'aspersione di percolato preventivamente riscaldato.

La regolazione della temperatura avviene per mezzo di un sistema di riscaldamento installato nella pavimentazione e nelle pareti del box di digestione. E' quindi possibile sfruttare in modo ottimale per la trasmissione del calore, tutta la superficie di contatto tra materiale in trattamento e box di digestione.

Dall'inizio della costruzione dell'impianto, nelle pareti dei box di digestione si prevede l'inserimento delle serpentine riscaldanti, in modo da rendere non necessaria l'ingombrante installazione di tali dispositivi all'interno dei box. In questo modo si ottiene un controllo ottimale della temperatura all'interno dei box di digestione.

In queste condizioni il processo di produzione del biogas (assenza di ossigeno e mesofilia costante) evolve attraverso una prima fase, detta acidogena, di demolizione delle molecole organiche e loro trasformazione in acidi grassi e acetato, ed una seconda fase, detta metanogena, di degradazione dei prodotti della fase acidogena in metano, anidride carbonica e acqua.

La quantità di biogas prodotto varia a seconda delle biomasse trattate, ad esempio utilizzando la frazione organica dei rifiuti si possono ottenere fra 115 e 160 m³ di biogas per tonnellata di rifiuto. La percentuale di metano presente nel biogas varia mediamente tra il 55 e il 65%.

Il ciclo operativo viene condotto fino a quando le quantità di biogas prodotto si mantengono su valori economicamente convenienti. Mediamente ciascun ciclo ha una durata di 4 settimane (Bekon (2013)).

Una volta ultimata la fase di digestione anaerobica, viene insufflato nei reattori un gas inerte per allontanare dall'interno il metano residuo; ciò al fine di evitare la formazione di miscele gassose potenzialmente esplosive (ossigeno – metano) all'atto dell'apertura del portellone. La sofisticata dotazione tecnologica consente la gestione automatica di tutte le fasi di processo, garantendo costantemente le condizioni ecologiche ottimali ai microrganismi presenti e la sicurezza per gli operatori.

4.3.7 Tecnologia, qualità e sicurezza degli impianti



Figura 4.6 Vista dei portoni di accesso ai digestori (Bekon (2013))

La tecnologia scelta, quindi, risulta semplice rispetto a quella richiesta nei processi di digestione ad umido, robusta e con bassi costi di gestione.

La tecnologia Bekon (Bekon (2013)) è inoltre una tecnologia di comprovata validità che è straordinariamente adatta come completamento di impianti di compostaggio già esistenti. I mezzi su ruote già presenti si possono sfruttare in modo ottimale. Non sono necessari pompe né agitatori. Il materiale da fermentare non deve di norma essere sottoposto a particolari pretrattamenti.

Per questo motivo il dispendio di risorse in termini di macchine e di personale è nettamente inferiore rispetto al procedimento di fermentazione a umido.

La progettazione, il dimensionamento e la costruzione di questo tipo di impianto avvengono nel pieno rispetto delle leggi, normative e direttive in materia, nonché secondo le più moderne conoscenze tecniche e scientifiche ad oggi disponibili.

Particolare attenzione viene prestata al settore costruttivo ed alla sicurezza degli impianti, nonché ad una elevata qualità delle forniture e servizi. Sono scrupolosamente rispettate le prescrizioni vigenti relativamente alle norme antideflagranti e antinfortunistiche (direttiva ATEX, normative sicurezza, ecc.).

Come azienda leader di mercato della digestione a secco Bekon garantisce il raggiungimento di cicli di processo estremamente funzionali e risultati ottimali (rendite di gas), grazie all'impiego di una modernissima tecnologia. Le numerose certificazioni e brevetti dimostrano il know-how Bekon (Bekon (2013)), inoltre, in oltre 10 anni di esperienza diretta, Bekon ha potuto acquisire numerosissime esperienze specifiche in materia, che si riflettono su un numero costantemente in crescita di progetti in Germania e all'estero.

4.3.8 Utilizzo del biogas e bilancio energetico

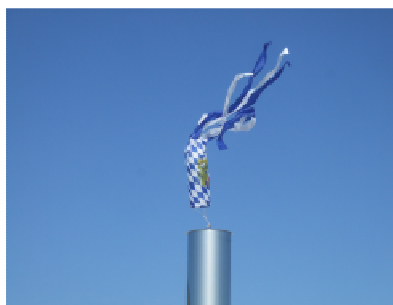


Figura 4.7 Torcia (Bekon (2013))

La tenuta, la captazione ed il convogliamento del biogas al cogeneratore rappresentano uno degli aspetti più delicati del sistema, sia per l'ottimizzazione delle rese produttive che per gli aspetti relativi alla sicurezza degli operatori.

Come detto in precedenza, i digestori sono realizzati per garantire la perfetta tenuta ai gas: pareti e pavimento in c.a. trattato con resine, portellone con interno in acciaio con guarnizione gonfiabile, sistema di aerazione forzata ed impianto di irrigazione dotati di valvole di sicurezza a tenuta di gas, sistema di evacuazione dei percolati.

Per quanto attiene la captazione del biogas, una valvola di sovrappressione opportunamente tarata "apre" quando nel digestore si raggiunge una determinata pressione favorendo il deflusso del biogas prodotto in un gasometro. Quest'ultimo è dedicato all'accumulo del biogas prodotto da più digestori e garantisce un'alimentazione regolare e costante del cogeneratore, previo passaggio del gas in un sistema di trattamento dedicato alla sua deumidificazione e desolforazione.

Il cogeneratore è costituito da un motore endotermico che utilizza il biogas come combustibile e che produce energia elettrica tramite un generatore ad esso accoppiato ed energia termica derivante dal raffreddamento del motore stesso.

Il sistema è dotato di una torcia di sicurezza che in caso di problemi all'impianto di cogenerazione provvederà alla combustione del biogas prodotto (Bekon (2013)).

Al termine della fase anaerobica il reattore deve essere ripulito dal biogas prima dell'apertura del portellone, in quanto l'ingresso di ossigeno, in presenza di metano, potrebbe innescare reazioni esplosive. Allo scopo è stato previsto un sistema di insufflazione di gas inerte e, solo dopo che nell'atmosfera del digestore non è più presente metano, si sbloccano i chiavistelli di chiusura del portellone.

Il biogas prodotto dall'impianto viene trasformato all'interno di una unità di cogenerazione compatta, in energia elettrica ed energia termica (calore). L'energia elettrica prodotta viene immessa attraverso un trasformatore di tensione, nella rete elettrica pubblica, beneficiando della tariffa agevolata.

Una parte dell'energia termica prodotta (sotto forma di acqua calda) viene utilizzata per il riscaldamento dei digestori, del serbatoio del percolato nonché dei locali tecnici e di servizio dell'impianto.

Il fabbisogno di energia (termica ed elettrica) proprio dell'impianto di digestione è particolarmente ridotto. In questo modo quasi tutta l'energia prodotta è disponibile per la cessione in rete e/o per altri utilizzatori esterni.

Solitamente il biogas viene essiccato e quindi alimentato alla unità di cogenerazione per la produzione di energia elettrica ed energia termica. Grazie alla forma costruttiva compatta con serbatoio di percolato internamente installato ed ai digestori completamente isolati l'impianto di digestione stesso consuma un ridotto quantitativo di energia termica, in maniera tale da poter riservare il restante calore prodotto agli utilizzatori esterni.

Oltre all'utilizzo del biogas all'interno di una unità di cogenerazione, è anche possibile raffinare ulteriormente il biogas ed alimentarlo così nella rete pubblica di gas naturale (se consentito dalle leggi).

4.3.9 Tecnologia di gestione dei processi

I digestori sono dotati di sonde e sensori che rilevano in continuo i principali parametri di processo: temperatura dell'atmosfera e temperatura della massa, pressione interna. Attraverso più punti di prelievo campioni di atmosfera vengono estratti dal digestore ed avviati ad un analizzatore di gas che determina la concentrazione di CH₄, CO₂, O₂, H₂S.

Gli stessi parametri sono inoltre controllati all'interno della vasca anaerobica di raccolta del percolato. Tutti i dati rilevati confluiscono ad un quadro elettrico di gestione e da questo ad un PC dedicato, a servizio di più digestori, sul quale è installato il software di gestione e controllo che governa l'intero sistema.

Il controllo dell'hardware dell'impianto viene realizzato attraverso un sistema PLC (unità di controllo a memoria programmabile). Questo consente, fra l'altro, anche il telecontrollo dell'impianto. Tutte le sonde di misurazione integrate in questo sistema, quali ad esempio termosonde e sensori di pressione, soddisfano gli standard industriali attuali.

Il controllo dell'impianto a livello software avviene attraverso una unità PLS (sistema di gestione processuale). Attraverso questa interfaccia operativa all'occorrenza è anche possibile modificare manualmente determinati parametri di esercizio. Le normali condizioni di esercizio, a regime, prevedono che l'impianto di digestione Bekon (Bekon (2013)), sia controllato in modo completamente automatico.

Il processo viene gestito dal software dedicato, che elabora i dati rilevati e controlla: il sistema di irrigazione, la commutazione delle valvole, l'apertura e chiusura del portellone frontale, rendendola possibile esclusivamente quando la concentrazione di metano all'interno del digestore scende sotto la soglia potenzialmente pericolosa eliminando i rischi di apertura accidentale (errore degli operatori), il gonfiaggio e lo sgonfiaggio della guarnizione. Inoltre, controlla e gestisce le temperature sia della massa che del percolato agendo rispettivamente sul sistema di riscaldamento a pavimento e sullo scambiatore.

Il software controlla e memorizza tutte le fasi del processo e segnala qualunque anomalia nei parametri reimpostati. Visualizza l'andamento del processo attraverso diagrammi di flusso e tabelle, menu delle funzioni disponibili e provvede all'archiviazione dei dati.

Dopo il carico di un reattore non sono richiesti interventi particolari da parte dell'operatore, che deve limitarsi a periodici controlli sullo stato del lotto in lavorazione; questo è possibile tramite le informazioni che compaiono a video: una tabella con tutti i parametri di funzionamento rilevati dal programma e un grafico che ne evidenzia l'andamento nel tempo.

In caso di problemi, apposite finestre di segnalazione avvertono l'operatore dello stato anomalo delle lavorazioni in corso. Il programma rileva inoltre i consumi elettrici orari e totali per ogni ciclo di lavorazione. Eventuali anomalie presenti durante l'esercizio, vengono direttamente rilevate dal sistema di avviso e segnalazione anomalie integrato e rispettivamente classificate. In caso di presenza di anomalie compromettenti la sicurezza, l'impianto viene automaticamente commutato in una condizione d'esercizio sicura. Ad esempio anche la condizione di mancanza di energia. Grazie a questa affidabile tecnologia, si possono evitare condizioni di sistema critiche.

Tutte le segnalazioni di anomalia vengono trasmesse dal sistema di supervisione, al dispositivo preposto, ad esempio direttamente ad un telefonino cellulare via SMS, nonché archiviate nella memoria dei protocolli con tutte le informazioni più rilevanti.



Figura 4.8 Comandi automatici con manutenzione a distanza (Bekon (2013))

4.3.10 Informazioni supplementari

Durante la messa in servizio di un impianto di digestione anaerobica, Bekon si impegna a formare il personale del gestore dell'impianto con un completo addestramento specialistico per tutta la durata della fase di messa in servizio, prova di funzionamento nonché collaudo tecnico di sicurezza. Offre inoltre al gestore un'assistenza costante affinché sia garantito il conseguimento di risultati di esercizio ottimali mediante la teleassistenza.

Grazie alla gestione pluriennale di numerosi impianti di digestione propri e grazie alla loro assistenza costante Bekon (Bekon (2013)) si avvale di un completo know-how anche in qualità di gestore.

L'esperienza diretta offre i seguenti vantaggi:

- maggiore sicurezza di progettazione e calcolo;
- elevata sicurezza di esercizio;
- assistenza professionale;
- cicli di processo efficienti e sfruttamento ottimale di biogas;
- costi di esercizio e manutenzione particolarmente ridotti.

Bekon gestisce continuamente sia presso la propria sede sia in cooperazione con gli istituti scolastici, lavori di ricerca e sviluppo nel settore del biogas nonché di utilizzo delle biomasse.

Il crescente numero di impianti realizzati, il ridotto consumo di energia elettrica, i ridotti costi di manutenzione e gestione, l'elevata stabilità dei processi, nonché l'elevato sfruttamento del potenziale della biomassa, sono elementi che abbinati alla tecnologia Bekon sono apprezzati dai numerosi clienti in tutto il mondo. Gli ordinativi in continua crescita, confermano che il mercato ha riconosciuto i vantaggi determinanti della tecnologia Bekon. La costruzione professionale e industriale degli impianti Bekon garantisce all'investitore e al gestore un regolare e remunerativo esercizio economico.

4.3.11 Sicurezza

Ognuno degli impianti Bekon di digestione anaerobica viene sottoposto a minuziosi controlli da parte di un ente certificatore indipendente e accreditato conformemente alle severissime norme di sicurezza europee per il conseguimento delle rispettive certificazioni.

Oltre al collaudo tecnico di sicurezza, sono controllati tutti i componenti rilevanti dell'impianto (apparecchiature, strumentazioni, gruppi ecc.) secondo le direttive attuali e le normative vigenti prima della messa in servizio, per accertarne il funzionamento perfetto ed impeccabile. Nell'ambito di questo primo controllo e dei futuri periodici controlli per quel che concerne la sicurezza e la compatibilità ecologica degli impianti Bekon (Bekon (2013)) a biogas gli aspetti seguenti rivestono un significato primario:

- sicurezza tecnica del gas;
- sicurezza funzionale ed elettrica;
- protezione antideflagrante e antincendio;
- tutela delle acque;
- protezione contro emissioni (inclusi odori e rumore);
- esecuzione costruttiva (impianti di ventilazione, vie di fuga, ricircolo dei gas di scarico ecc.).

I singoli certificati e le verifiche vengono documentati in una relazione generale, predisposta per il gestore dell'impianto, come documentazione e certificazione nei confronti delle autorità competenti, associazioni di categoria o istituti assicurativi.



Figura 4.9 Dettagli di un impianto Waste to Energy (Bekon (2013))

4.3.12 Standard di sicurezza ed emissione

Tutti gli impianti Bekon (Bekon (2013)) sono costruiti e gestiti secondo standard di sicurezza recentissimi. Ogni impianto viene sottoposto ad una verifica prima della messa in servizio da parte di un certificatore tecnico indipendente e successivamente collaudato.

Oltre alla sicurezza di esercizio anche in questo settore viene data la massima importanza alla protezione contro le emissioni. Un fattore principale determinante per la riduzione delle emissioni, consiste nella biodegradazione del substrato utilizzato, il digestato infatti presenta un potenziale di gas residuo straordinariamente ridotto. Per lo stoccaggio dei residui di digestione liquidi, si consiglia l'utilizzo di un serbatoio di stoccaggio chiuso.

Il residuo della digestione in forma solida, venendo ad immediato contatto con l'aria esterna presso il vano di stoccaggio, interrompe subito la produzione restante di metano. Per l'ulteriore riduzione delle emissioni si utilizzano biogas a basso contenuto di zolfo e il catalizzatore di ossigeno installato come standard per la depurazione dei gas di scarico provenienti dall'unità di cogenerazione compatta. Grazie a ciò è possibile mantenere i valori dei gas di scarico ampiamente al di sotto dello standard prescritto dalle autorità competenti.



Figura 4.10 Panoramica impianto e gestione operativa (Bekon (2013))

4.4 Applicazioni reali della tecnologia scelta

Di seguito si riportano gli impianti di riferimento già realizzati con la tecnologia Bekon diffusamente descritta in precedenza (Bekon (2013)).

4.4.1 Impianti di riferimento in Germania

➤ Monaco di Baviera



Rifiuti organici e sfalci	25,000 t/anno
Potenza elettrica	570 kW
In esercizio da	11/07

➤ Saalfeld, Turingia



Rifiuti organici ed industriali	20,000 t/anno
Potenza elettrica	1,050 kW
In esercizio da	11/07

➤ **Kusel, Renania-Palatinato**



Rinnovabili	7,500 t/anno
Potenza elettrica	330 kW
In esercizio da	01/07

➤ **Rendsburg, presso Amburgo**



Rifiuti organici ed industriali	30,000 t/anno
Potenza elettrica	1,050 kW
In esercizio da	11/08

➤ **Göhren, Turingia**



Rinnovabili	14,000 t/anno
Potenza elettrica	625 kW
In esercizio da	06/08

➤ **Melzingen, presso Amburgo**



Rinnovabili	11,000 t/anno
Potenza elettrica	500 kW
In esercizio da	06/08

➤ **Ostrhauderfehn, presso Oldenburg**



Rinnovabili	12,000 t/anno
Potenza elettrica	500 kW
In esercizio da	12/08

➤ **Vechta, presso Brema**



Rifiuti organici ed industriali	10,000 t/anno
Potenza elettrica	330 kW
In esercizio da	12/08

➤ **Schmölln, Turingia**



Rinnovabili	16,000 t/anno
Potenza elettrica	1,050 kW
In esercizio da	11/09

➤ **Erfurt, Turingia**



Rifiuti organici ed industriali	20,000 t/anno
Potenza elettrica	660 kW
In esercizio da	11/08

➤ **Bassum**



Rifiuti organici ed industriali	18,000 t/anno
Potenza elettrica	625 kW
In esercizio da	11/09

➤ **Pohlsche Heide**



Rifiuti organici ed industriali	40.000 t/anno
Produzione di gas	500 Nm ³ /h
In esercizio da	11/09

➤ **Steinfurt**



Rifiuti organici ed industriali	44.400 t/anno
Produzione di gas	1.050 Nm ³ /h
Messa in esercizio	11/13

4.4.2 Impianti di riferimento in Italia

➤ Cesena



Rifiuti organici ed industriali	30,000 t/anno
Potenza elettrica	1,050 kW
In esercizio da	12/09

➤ Napoli



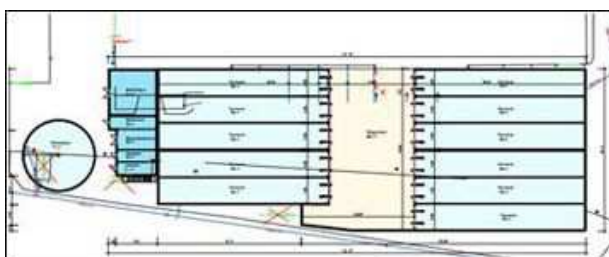
Rifiuti organici ed industriali	30.000 t/anno
Potenza elettrica	1.052 kW
In esercizio da	06/11

➤ **Codroipo**



Rifiuti biologici	31.500 t/a
Potenza elettrica	1.000 kW
Messa in esercizio	12/13

➤ **Sant'Agata Bolognese**



Rifiuti biologici	40.000 t/a
Potenza elettrica	1.000 kW
Messa in esercizio	12/13

4.4.3 Impianti di riferimento in Francia

➤ **Eteignière**



Frazione organica dei rifiuti municipali	33.000 t/a
Potenza elettrica	1.000 kW
Messa in esercizio	12/14

4.4.4 Impianti di riferimento in Svizzera

➤ Baar



Rifiuti organici ed industriali	18,000 t/anno
Potenza elettrica	500 kW
In esercizio da	10/09

➤ Thun



Rifiuti organici	20,000 t/anno
Potenza elettrica	950 kW
Messa in servizio	12/10

A questi si affiancano altre progettazioni in fase di realizzazione, che si riportano per completezza di esposizione (Bekon (2013)):

- Impianto di **Voltana** (Italia) - Substrato: rifiuti biologici; Potenza elettrica: 1000 kW; Volume annuo: 35.000 t/a; Messa in esercizio: 12/12.
- Impianto di **Rimini** (Italia) - Substrato: rifiuti biologici; Potenza elettrica: 1000 kW; Volume annuo: 35.000 t/a; Messa in esercizio: 12/12.
- Impianto di **Modena** (Italia) - Substrato: rifiuti biologici; Potenza elettrica: 1000 kW; Volume annuo: 40.000 t/a; Messa in esercizio: 12/13.
- Impianto di **Strasburgo** (Francia) - Substrato: frazione organica dei rifiuti municipali; Biogas upgrading: 500 Nm³/h; Volume annuo: 30.000 t/a; Messa in esercizio: 06/14.
- Impianto di **Brametot** (Francia) - Substrato: frazione organica dei rifiuti municipali; Potenza elettrica: 526 kW; Volume annuo: 13.000 t/a; Messa in esercizio: 12/13.
- Impianto di **Beauvais** (Francia) - Substrato: frazione organica dei rifiuti municipali; Potenza elettrica: 660 kW; Volume annuo: 20.000 t/a; Messa in esercizio: 06/14.

5. Progettazione impianto di digestione anaerobica a secco

Sulla base degli approfondimenti sviluppati in sede di analisi dell'impianto di digestione ad umido, analizzato in maniera particolareggiata in precedenza (Capitolo 3), si è ritenuto interessante da molti punti di vista il rivedere l'intera struttura dell'impianto mediante una tecnologia di tipo dry mesofilo.

In questo capitolo si procederà dunque alla progettazione dell'impianto di digestione anaerobica sulla base della tecnologia a secco di cui si è diffusamente detto nel capitolo precedente.

I motivi d'interesse principali emersi già in sede di analisi preliminare per un lavoro di tesi di questo tipo sono stati:

1. La disponibilità di rifiuti con alto tenore di sostanza solida (25,6% di SS per la F.O.R.S.U. nonché 50% di SS per gli sfalci e potature provenienti dalle attività agricole nei dintorni dei Comuni di interesse), senza previsione di aggiunta di altre matrici umide (quali, ad esempio, fanghi da depurazione delle acque reflue); per cui, esistendo tecnologie in grado di trattare questo materiale "a secco", senza doverlo diluire con apporto di liquido esterno e relativi costi ed aggravii di interventi tecnologici sia in fase di costruzione che di gestione, è certamente più vantaggioso riferirsi ad esse;

2. La mancanza, nelle piattaforme integrate di trattamento rifiuti nella zona di intervento, di un impianto di trattamento di acque reflue in cui inserire quelle residue del processo di digestione anaerobica.

L'eventuale scelta di un processo ad umido risulterebbe penalizzante, soprattutto in termini economici: infatti, se è vero che buona parte della frazione liquida separata dal "digestato" viene normalmente riutilizzata per diluire i rifiuti in ingresso, occorre pretrattarla per diminuirne il carico inquinante, soprattutto azotato, con relativi costi; nella gestione del ciclo nel tempo giunge poi, comunque, un momento in cui il liquido esterno aggiunto inizialmente raggiunge la saturazione di sostanze indesiderate ed andrà, quindi, trattato e smaltito;

3. La volontà di minimizzare al massimo la perdita di sostanza volatile nei pretrattamenti per massimizzare la produzione di biogas (viene per questo motivo consigliato dalle B.A.T. il sistema a secco): dal momento che i pretrattamenti in impianti a secco sono limitati, non si osserva perdita di materiale organico biodegradabile, come invece avviene nel corso dei pretrattamenti per materiale da trattare con sistemi wet o semi-dry;

4. Le rese in produzione di biogas per tonnellata di materiale in ingresso sono, invece, in minima parte minori, e comunque compensate al termine del processo da una produzione di energia elettrica e termica maggiore;

5. I sistemi a secco consentono dunque di evitare la diluizione dei materiali avviati a processo con grandi quantità di acqua, con conseguente riduzione dei volumi di digestato da smaltire; inoltre la gestione di un digestato solido è molto meno problematica ed onerosa rispetto a quella di un prodotto liquido;

6. La digestione a secco, inoltre, può essere condotta in batterie di reattori anziché in un unico digestore di grandi dimensioni e ciò consente una maggiore flessibilità operativa e scongiura il rischio del blocco totale della produzione di energia in caso di interruzioni del processo biologico;

7. Nei sistemi a secco i flussi molto densi che giungono nei reattori di digestione anaerobica portano al superamento della suddivisione di tre fasi distinte all'interno dei reattori. La miscelazione tra rifiuto influente e biomassa avviene grazie al ricircolo dell'effluente estratto dal fondo dei digestori anaerobici che viene pompato nella parte superiore del reattore stesso: la capacità dei sistemi dry di sopportare shock derivanti da carichi di ammoniaca risiede probabilmente proprio nel fatto che la miscelazione non perfetta ed omogenea tipica di questi processi sottopone solo una parte della biomassa metanigena, in zone limitate del reattore, alle condizioni di stress;

8. Infine risulta decisiva la valutazione in merito ai pretrattamenti necessari per la preparazione del rifiuto prima della digestione: nel caso di adozione di un sistema ad umido si rende necessario un sistema di miscelazione del substrato con acqua e di omogeneizzazione, al fine di raggiungere il tenore di umidità necessario e di rendere il materiale pompabile; nel sistema a secco invece la FORSU entra nel processo tal quale, a seguito di una semplice miscelazione meccanica con lo strutturante.

Oltre ai motivi suddetti, nel corso degli approfondimenti e delle varianti sviluppate, si sono via via evidenziati numerosi risvolti positivi in sede di comparazione, che anche in questo caso seguiranno, per una maggiore chiarezza di esposizione, gli aspetti fondamentali evidenziati in precedenza.

5.1 Tecnologie e producibilità energetica

5.1.1 Aspetti progettuali

Il trattamento di digestione anaerobica a secco viene dimensionato sempre per la portata di 80 t/g di FORSU e rifiuti putrescibili provenienti dal bacino di interesse, alla quale però viene aggiunta una quota addizionale di legno e ramaglie di scarto che costituiscono il materiale strutturante necessario per un migliore funzionamento dei reattori scelti.

L'impianto di digestione anaerobica e post-digestione aerobica della frazione organica dei rifiuti urbani può essere anche in questo caso schematicamente suddiviso in diversi reparti:

- ricezione;
- pretrattamento;
- miscelazione substrati;
- digestione anaerobica;
- produzione di energia;
- biossificazione accelerata;
- post-maturazione.

I rifiuti in ingresso all'impianto vengono trasferiti dai mezzi di raccolta al reparto ricezione, nel quale vengono stoccati all'interno di una fossa interrata oppure su un piazzale di scarico a raso.

Lo strutturante segue un percorso parallelo e viene stoccato nell'area ad esso preposta, vicina al reparto di miscelazione.

Dal reparto ricezione i soli rifiuti vengono alimentati al reparto pretrattamento, nel quale vengono sottoposti alle operazioni atte a consentire l'eliminazione delle componenti indesiderate per la successiva fase di digestione anaerobica, quali ad esempio inerti e plastiche.

I rifiuti così pretrattati sono stavolta già pronti per essere miscelati con il materiale ligneo-cellulosico ed avviati alla digestione anaerobica.

Risulta dunque evidente la semplificazione tecnologica già in questa prima fase rispetto al processo ad umido: non si rende più necessaria l'omogeneizzazione del substrato e la regolazione dell'umidità attraverso miscelazione con acque esterne e di ricircolo.

All'interno del capannone dei pretrattamenti avviene una prima lavorazione che consiste nella miscelazione tra rifiuti putrescibili e materiale strutturante. Il materiale putrescibile in arrivo viene lavorato giornalmente miscelandolo con lo strutturante e trasferito nei reattori per la digestione anaerobica.

La *miscela*, con caratteristiche chimico-fisiche ottimali, viene alimentata nei digestori, dopo averla omogeneizzata con una quota prestabilita di digestato.

Il reparto di digestione anaerobica è costituito da reattori in parallelo realizzati con tecnologie di gestione automatica del processo. In questi digestori avviene, in condizioni controllate, la degradazione della sostanza organica e la produzione di biogas.



Figura 5.1 Operazioni di carico e scarico con pala gommata (Bekon (2013))

Il *biogas* prodotto, contenente circa il 50-60% di metano, viene stoccato in un gasometro esterno, quindi depurato e avviato al reparto di produzione di energia (elettrica e termica), che è in parte utilizzata per gli autoconsumi dell'impianto ed in parte commercializzata all'esterno.

Il *fango* digerito viene estratto dalle unità di digestione anaerobica e, grazie al suo ridotto contenuto di umidità, non necessita di operazioni di disidratazione.

Quest'ultimo viene in parte ricircolato al reparto di preossidazione e per la restante parte avviato alla sezione di stabilizzazione aerobica, che si compone di una prima fase di bioossidazione accelerata e di una successiva post-maturazione.

Notevole risulta quindi il vantaggio della completa eliminazione del processo di depurazione chimico-fisica dei fanghi di processo.

Il prodotto ottenuto viene avviato al reparto di raffinazione per l'eliminazione di quelle impurità che potrebbero comprometterne il successivo utilizzo.

Nei punti successivi verranno descritti con maggior dettaglio i vari reparti dell'impianto.

5.1.2 Operazioni di pretrattamento

I mezzi di trasporto conferiscono separatamente i rifiuti ed il materiale strutturante in impianto; sono sottoposti ancora una volta ai controlli di regolarità della documentazione d'accompagnamento e di verifica della loro qualità, quindi successivamente inviati alla registrazione per mezzo del sistema di pesatura. Al termine delle operazioni di riconoscimento e pesatura in ingresso, i mezzi scaricano nell'area adibita ad accumulo, ovvero un capannone dimensionato per poter accogliere quantità di rifiuti corrispondenti ad almeno 3 giorni di conferimento.

Un incaricato dell'impianto sorveglierà le operazioni di scarico e successivamente i rifiuti vengono prelevati con una pala gommata e avviati alla fase di pretrattamento meccanico.

Al fine di evitare la diffusione di odori verso l'esterno è previsto anche in questo caso un impianto di aspirazione e di trattamento dell'aria, per una portata equivalente a circa 3 ricambi/ora, che mantiene in depressione il fabbricato. L'aria aspirata viene trattata con abbattitori Scrubber e Biofiltro, per il controllo delle emissioni odorigene, prima del rilascio in atmosfera.

I pretrattamenti per il legno e le ramaglie, preposte a fungere da strutturante, si limitano alla semplice triturazione, mentre la depurazione dell'aria risulta superflua, vista la natura del materiale e lo scarso tempo di permanenza nei capannoni.

E' comunque prevista l'installazione di un sistema di lavaggio dei mezzi gommati che trasportano la FORSU e i rifiuti putrescibili al fine di ridurre lo spandimento di materiali inquinanti nella rete viaria dell'impianto.

Le operazioni preliminari semplificate cui vengono sottoposti i rifiuti sono essenzialmente rivolte alla predisposizione della miscela per le fasi di reazioni biologiche, e specificatamente:

- **Triturazione**, mirata alla completa apertura di tutti i contenitori e ad una riduzione in pezzatura congruente con le successive fasi;
- **Vagliatura**, mirata alla separazione della frazione umida (sottovaglio) dalle frazioni indesiderate (sopravaglio).

La spremitura e la regolazione dell'umidità, con apporto di acqua esterna e/o di ricircolo per la diluizione della sostanza secca, non sono in questo caso necessari per il passaggio alla fase successiva di preossidazione.

I rifiuti prelevati con la pala gommata dalla sezione di ricezione e stoccaggio vengono caricati nel trituratore aprisacchi, dotato di una ampia tramoggia di carico, per essere liberati dai sacchi che lo contengono e subire una idonea frantumazione che non sia deleteria per le fasi di reazioni biologiche.

Il materiale, una volta triturato, cade su sottostante trasportatore a piastre metalliche rivestito in gomma che provvede ad alimentare il vaglio rotante ove avviene la separazione della frazione umida (sottovaglio) dalla frazione inerte e indesiderata (sopravaglio).

Il processo di vagliatura genera quindi, come visto in precedenza, due flussi denominati:

- il *flusso di sottovaglio*, composto in prevalenza da parti avente granulometria inferiore ai fori esistenti sulla rete vagliante, intercettato dal trasportatore in gomma di raccolta sottovaglio;
- il *flusso di sopravaglio*, composto dalla rimanente parte avente granulometria superiore ai fori esistenti sulla rete vagliante e dalle quantità di frazione solida costituita da plastiche e inerti privi di sostanza organica, intercettato dal trasportatore di uscita sopravaglio.

La frazione umida intercettata dai trasportatori di raccolta sottovaglio viene miscelata con lo strutturante secondo proporzioni definite (70% FORSU e 30% strutturante) e quindi trasferita ai reattori di digestione anaerobica. La frazione inerte, invece, viene intercettata dal trasportatore di uscita sopravaglio e viene scaricata in un cassone scarrabile che viene successivamente allontanato dall'impianto, in quanto non compatibile con il processo.

La miscela, preliminarmente alla di digestione anaerobica, viene omogeneizzata con una quota prestabilita di digestato (60% di FORSU preossidata con 40% di digestato) che viene fatto ricircolare dalla fase anaerobica.

La miscela così ottenuta va ad alimentare i digestori anaerobici. Si rimanda al capitolo precedente per la descrizione dettagliata della tecnologia a secco adottata e dimensionata di seguito.

5.1.3 Dimensionamento della fase di digestione anaerobica



Figura 5.2 Digestori anaerobici in parallelo (Bekon (2013))

Il dimensionamento dei digestori per il trattamento della frazione organica selezionata è stato condotto considerando il carico volumetrico alimentato giornalmente (l'unico parametro da considerare in questo caso è il tempo di ritenzione idraulico).

Ricordando i valori di HRT nelle varie condizioni di processo per diversi substrati in alimentazione visti in precedenza, oltre alle prescrizioni legate alla tecnologia specifica scelta, ed essendo un processo a secco in regime termico mesofilo, viene considerato un valore prudenziale pari a: $HRT = 28$ giorni.

Viene adottata anche in questa sede una procedura di calcolo suddivisa nelle fasi seguenti.

1° fase – Determinazione dei flussi di massa in ingresso

Il flusso di massa in ingresso, inteso come rifiuti tal quale, sarà a regime lo stesso visto in precedenza, e quindi pari a 80 t/g di FORSU; il valore da considerare deve tener conto dei trattamenti preliminari del rifiuto conferito all'impianto, per cui si considera un valore di 70 t/g di rifiuto selezionato e mondato dei sovralli.

Le caratteristiche del flusso di alimentazione sono ovviamente sempre quelle tipiche dei rifiuti organici da raccolta differenziata.

A questo vengono stavolta aggiunte 30 t/g di legno e ramaglie con funzione di materiale strutturante, attraverso un'attenta operazione di miscelazione.

Essendo stavolta il processo a secco non si rende necessaria alcuna diluizione del substrato, infatti è sufficiente, per garantire il tenore di secco e la producibilità di biogas desiderata, l'unico ricircolo previsto, ovvero quello del percolato all'interno degli stessi reattori anaerobici.

Dunque qualsiasi approvvigionamento esterno di acqua dalla rete pubblica diviene in questo caso inutile, ed il materiale in ingresso ai digestori sarà composto dalle seguenti matrici:

$$\begin{aligned} &100 \text{ t/g di FORSU + strutturante} \\ &67 \text{ t/g di digestato} \end{aligned}$$

2° fase - Determinazione del carico organico per m³ di reattore e calcolo del volume utile

Si prendono in considerazione le seguenti densità dei substrati in alimentazione:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{FORSU}} &= 1,20 \text{ m}^3/\text{t} \\ \rho_{\text{digestato}} &= 1,68 \text{ m}^3/\text{t} \\ \rho_{\text{strutturante}} &= 2,80 \text{ m}^3/\text{t} \end{aligned}$$

La portata giornaliera di substrato in alimentazione viene determinata come:

$$\begin{aligned} Q_{\text{substrato}} &= \sum q_i \cdot \rho_i = 168 \text{ m}^3/\text{g} \text{ (FORSU + strutturante)} \\ Q_{\text{digestato}} &= 112,6 \text{ m}^3/\text{g} \text{ (digestato)} \end{aligned}$$

Il volume di calcolo complessivo dei digestori risulta quindi pari a:

$$V_{\text{digestori}} = (Q_{\text{substrato}} + Q_{\text{digestato}}) \cdot HRT = 7856 \text{ m}^3$$

Questa volumetria viene aumentata cautelativamente a 7990 m^3 e suddivisa in 6 celle anaerobiche in parallelo, ciascuna avente un volume di 1332 m^3 e geometria definita dalle seguenti dimensioni interne:

altezza 5,8 m
larghezza 8,2 m
lunghezza 28,0 m



Figura 5.3 Riempimento biocelle (Bekon (2013))

Per lo stoccaggio del biogas all'interno dell'impianto si è scelto di utilizzare un **gasometro esterno** di 3200 m^3 , dimensionato per garantire un accumulo di 7 ore di produzione.

Il **digestato** all'uscita dai digestori viene valutato come portata giornaliera secondo le seguenti valutazioni:

Produzione giornaliera di biogas = $10500 \text{ m}^3/\text{g}$

Peso specifico del biogas = $1,4 \text{ kg/m}^3$

Peso di substrato trasformato in biogas al giorno = 14700 kg

Portata del digestato in uscita = 152300 kg/g

Il digestato, costituito da materia non digerita ed acqua, esce dal digestore come miscela semisolida, per cui in questo caso può essere avviato direttamente alla sezione di compostaggio senza la necessità, che si aveva nell'impianto a umido, di passare per una fase di disidratazione, al fine di ottenere un prodotto più concentrato, avente caratteristiche fisiche compatibili con la successiva fase di stabilizzazione aerobica. Non vi è infatti alcuna necessità di aggiungere materiale strutturante al digestato, essendo in esso già contenuto, inoltre l'umidità residua dalla digestione anaerobica a secco si rende alternativa alla altrimenti necessaria umidificazione durante il processo di compostaggio.

La portata del digestato in uscita viene dunque suddivisa in due flussi:

- Ricircolo del digestato per la miscelazione con la miscela preossidata: $67,0 \text{ t/g}$
- Portata di digestato avviata direttamente a compostaggio: $85,3 \text{ t/g}$

Il fango digerito prodotto dalla fase di metanizzazione risulta in genere non completamente stabilizzato, a causa del ridotto tempo di residenza all'interno del reattore.

A tale scopo è prevista la fase di stabilizzazione aerobica, finalizzata al completamento della degradazione della materia organica, più difficilmente degradabile, ed all'ottenimento dell'igienizzazione del materiale.

Sistema di trattamento delle acque di pioggia: Il sistema di raccolta delle acque meteoriche di progetto è di tipo lineare a gravità e non viene in alcun modo interessato da acque di processo. Tale sistema prevede la raccolta a mezzo di condotte interrate in PVC rigido.

Lungo la rete di raccolta sono stati previsti pozzetti di raccolta coperti da griglie carrabili in ghisa delle dimensioni 100x100 cm (caditoie). La profondità di interrimento delle tubazioni sarà variabile in funzione dell'andamento lineare del percorso utilizzato ed in modo da dover garantire una pendenza compresa tra 0,8% e 1,00% con un minimo di profondità pari a 60 cm sotto il livello stradale finito.

Il progetto prevede che le acque di piazzale raccolte attraversino un impianto di trattamento progettato per sottoporre le acque meteoriche rivenienti dal piazzale ad un trattamento di grigliatura, sedimentazione e disoleatura; le acque di seconda pioggia, così trattate, verranno inviate alle vasche di raccolta.

Le acque di prima pioggia passeranno, invece dalla fase che prevede l'eliminazione delle sostanze pericolose (Tab. 5, dell'Allegato 5 alla Parte III, accluso al D. Lgs.n. 152/2006) ovvero di tutte quelle potenzialmente dannose per l'ambiente (Allegato Tab. 8, Parte III, D. Lgs. n. 152/2006), secondo un ciclo chimico-fisico, prima di essere inviate alle vasche di raccolta per essere riciclate come acque di processo.

Le acque meteoriche di dilavamento, in arrivo al pozzetto di partizione, corrispondenti a quelle di prima pioggia (normalmente correlate ad un'altezza di precipitazione uniforme pari a 5 mm), sono avviate per gravità alla vasca di accumulo, il cui equipaggiamento ne permette la chiusura idraulica, una volta che sia stato raggiunto il volume normale richiesto.

Le acque di prima pioggia sono invase nel suddetto bacino di accumulo, di capacità tale da contenere tutto il volume delle acque meteoriche di dilavamento, risultante dai primi 5 mm di pioggia caduta sulla superficie impermeabile scoperta pari a 13279 m².

Nel periodo successivo, corrispondente al deflusso delle acque di seconda pioggia (acque, cioè, eccedenti i primi 5 mm), non essendo possibile l'ingresso in tale vasca, il livello idrico rigurgiterà nel pozzetto partitore salendo sino alla quota di sfioro, deviando così, le stesse, verso il trattamento secondario di sedimentazione e disoleatura.

$$V_{\text{acque di 1 pioggia}} = S (\text{superficie impermeabile scoperta}) \times 5 \text{ mm}$$

Si prevede uno stoccaggio, in via cautelativa, delle acque di prima pioggia in una vasca di accumulo di 160 m³.

Le acque di prima pioggia saranno quindi inviate all'impianto di trattamento del tipo chimico-fisico presente in azienda.

Con la chiusura della valvola della vasca di prima pioggia, l'acqua passa dal pozzetto scolmatore alla vasca di dissabbiatura seconda pioggia per la separazione del materiale sabbioso e limoso. Successivamente l'acqua passa al disoleatore di seconda pioggia per subire la disoleazione e successivamente essere inviate alla vasca di accumulo per l'utilizzo nel ciclo produttivo.

Alla fine del trattamento, anche le acque di seconda pioggia, rispetteranno i parametri della tab. 4 all. 5 D.Lgs. 152 del 03.04.2006 parte terza, per essere riciclate come acque di processo tramite le vasche interrate di accumulo.

5.1.4 Dimensionamento della fase di recupero energetico del biogas

La produzione di biogas costituisce uno dei principali vantaggi della digestione anaerobica dei rifiuti, grazie al consistente recupero energetico che si riesce a conseguire tramite il suo utilizzo. Pertanto l'intero processo deve essere condotto in maniera tale da massimizzare le rese di metanizzazione.

La portata all'uscita dal digestore può presentare, come osservato in precedenza, delle variazioni importanti, cui corrisponde anche una variazione della qualità del biogas prodotto, il cui tenore in metano può oscillare dal 45 al 65 %.

Queste variazioni sono dovute alla differente velocità di degradazione dei diversi componenti della materia organica degradabile. Infatti, poco dopo l'introduzione del substrato nel digestore, i primi componenti si degradano, producendo un biogas molto ricco di anidride carbonica, mentre gli altri componenti si degradano più tardi con produzione di un biogas più ricco in metano.

I due parametri, portata e concentrazione di CH_4 , variano in senso opposto: durante il caricamento del digestore si ha una grande portata di biogas a basso contenuto di metano, mentre lontano del caricamento, si ha una portata ridotta ma ricca di metano.

Il rendimento in biogas del processo, espresso in termini di m^3/t di substrato alimentato, è molto variabile e dipende dalla frazione biodegradabile del substrato. Infatti non tutta la sostanza organica presente nel digestore viene convertita in biogas, ma solo una sua frazione.

All'uscita del digestore sarà prevista, come in precedenza, una filtrazione per eliminare le particelle liquide o solide che potrebbero essere trascinate dal biogas, in modo tale da proteggere le soffianti o i compressori che verranno utilizzati per l'alimentazione del gas alla fase di cogenerazione.

La produzione di biogas giornaliera può essere calcolata utilizzando la seguente procedura:

Volume di biogas ottenuto da 1t di substrato: $120 \text{ m}^3/\text{t}$ (FORSU)

$70 \text{ m}^3/\text{t}$ (strutturante)

Produzione giornaliera di biogas = $70 \text{ t} \times 120 \text{ m}^3/\text{t} + 30 \text{ t} \times 70 \text{ m}^3/\text{t} = 10500 \text{ m}^3 \text{ biogas/g}$

Stimando un potere calorifico inferiore di $5500 \text{ kcal}/\text{m}^3$, avremo la potenzialità energetica giornaliera:

Potenzialità energetica = $5500 \text{ kcal}/\text{m}^3 \times 10500 \text{ m}^3 \text{ biogas/g} = 57'750'000 \text{ kcal/g}$

La spesa energetica per riscaldamento consta di due voci: il riscaldamento del rifiuto in ingresso alla temperatura di esercizio per il mantenimento del processo in regime mesofilo e le perdite di calore del digestore.

Prima dell'utilizzo a fini energetici il biogas deve essere sottoposto agli stessi trattamenti di depurazione visti in precedenza. Infatti la presenza di anidride carbonica, azoto ed acqua provoca l'abbassamento del potere calorifico della miscela, mentre sostanze come l'idrogeno solforato ed i composti organici alogenati, che possono essere presenti nel biogas, si comportano da agenti corrosivi, causando sensibili danni agli impianti di utilizzazione.

Tali trattamenti sono finalizzati ad ottenere un sensibile abbassamento dei costi di conduzione e manutenzione delle macchine, un funzionamento ottimale ed una maggior affidabilità, oltre alla garanzia di rispetto dei limiti di emissione imposti dalla legge.

Per l'aspirazione e la mandata del biogas dal digestore all'impianto di cogenerazione, è previsto anche in questo caso l'utilizzo di un sistema di due soffianti e aspiratori, da posizionare a valle del sistema di trattamento del biogas e della torcia.

I filtri a ghiaia vengono utilizzati come elemento per la filtrazione primaria, dispositivo di sicurezza contro i ritorni di fiamma e come scaricatori di condensa lungo le linee di trasporto biogas.

I filtri a candele ceramiche vengono installati lungo le linee di trasporto biogas, solitamente a monte dei sistemi di recupero energetico, per la rimozione di particelle fini e per l'accumulo e scarico di condensa.

Il trattamento di deumidificazione come osservato in precedenza è necessario in quanto l'umidità, di cui il biogas è saturo, può condensare all'interno delle tubazioni, in seguito a variazioni di temperatura e/o pressione, provocando malfunzionamenti. Il sistema di deumidificazione è costituito da un gruppo frigorifero che raffredda il gas da inviare ai motori. In tal modo si separa dalla miscela gassosa l'umidità che, condensando, viene allontanata precipitando al contempo sostanze nocive e corrosive presenti nel flusso gassoso stesso.

In aggiunta al desolforatore è previsto l'impiego di un filtro a carboni attivi.

In tutti gli impianti con produzione di biogas è necessario prevedere la presenza di una torcia di emergenza che garantisca la combustione del biogas prodotto. Il dimensionamento della torcia è fatto in modo tale da consentire non solo la combustione della portata normale del biogas, ma anche dei quantitativi provenienti dall'eventuale svuotamento rapido di tutti gli stoccaggi.

5.1.5 Dimensionamento della fase di compostaggio

La "digestione aerobica" è l'ultima fase di trattamento del processo descritto dal presente progetto dopo che la FORSU è stata "pretrattata" e di "digerita anaerobicamente".

Il contenuto di umidità del materiale da compostare e l'uniformità, specialmente se si vuole ottenere un prodotto finale di qualità, sono elementi di estrema importanza.

Poiché l'ossigeno si diffonde molto più lentamente nell'acqua che nell'aria, *il contenuto di acqua presente influenza notevolmente il processo. L'eccesso di umidità riduce la diffusione dell'ossigeno.*

Sono state anche queste osservazioni, sottolineate nel processo ad umido in quanto motivazioni dell'interposizione di un sistema di disidratazione, a far aumentare l'interesse, in fase di valutazione preliminare, per una tecnologia a secco.

In questo modo si garantisce, infatti, sin dall'uscita dalla fase di digestione anaerobica una la porosità del substrato sufficiente a condurre la miscela direttamente a compostaggio, riducendo in tal modo i costi legati ai macchinari preposti alla disidratazione, nonché i consumi di energia necessaria per insufflare aria nella matrice da compostare.

All'interno dei comparti di maturazione, si è resa necessaria una sola rete indipendente di alimentazione del sistema di umidificazione. Infatti il materiale in uscita dalla digestione anaerobica non viene disidratato, bensì inviato direttamente a compostaggio con la sua umidità residua, quindi sarà sufficiente la rete alimentata con le acque di pioggia opportunamente depurate per garantire l'umidificazione necessaria alla massa compostata. In questo modo si evita inoltre di spargere liquido con agenti patogeni nei comparti che hanno già superato la fase di igienizzazione.

Durante il processo di maturazione, in funzione delle temperature rilevate sul materiale, viene variata la portata d'aria di insufflazione per favorire il riscaldamento o il raffreddamento della massa. Saranno installate su ciascun comparto delle sonde per monitorare la condizione termica del cumulo di rifiuti.

Vale anche in questo caso l'accorgimento che riguarda la realizzazione di 2 setti di separazione in c.a., utili a differenziare le corsie di maturazione in 4 comparti stagni, tali da rendere facilmente distinguibili e gestibili i cumuli in coltivazione, una volta che gli stessi hanno raggiunto il ciclo di permanenza previsto di sette giorni.

Per quel che riguarda la vagliatura, si provvederà con un vaglio rotante con porte d'ispezione insonorizzate che riducono notevolmente gli impatti acustici all'interno del capannone; questo vaglio servirà ad affinare la qualità del compost separando le particelle grossolane.

Per il controllo dei cattivi odori e delle polveri generati nelle diverse fasi di lavorazione è prevista la presenza di biofiltri, con capacità tali da garantire le necessità volumetriche in funzione delle dimensioni dei capannoni e delle lavorazioni a cui servono.

Per quanto riguarda le polveri che potrebbero prodursi sono stati previsti degli scrubber a monte dei biofiltri per abbattere sia le polveri che le sostanze azotate ed ammoniacali in eccesso.

Secondo criteri usuali di dimensionamento, in presenza di esalazioni maleodoranti di origine organica, si sono assunti i seguenti ricambi orari e volumi di aspirazione concentrata nei capannoni:

Capannone ricezione e miscelazione rifiuti: $V = 7800 \text{ m}^3$ ricambi/h = 3
Capannone compostaggio: $V = 9000 \text{ m}^3$ ricambi/h = 4

I biofiltri sono bioreattori a letto fisso costituiti da un supporto di materiale organico su cui viene fatta sviluppare una opportuna popolazione batterica, la cui funzione è quella di degradare biologicamente le sostanze organiche volatili a composti elementari anidride carbonica, azoto e acqua.

Dal punto di vista impiantistico i biofiltri, così come i ventilatori e gli scrubber sono gli stessi scelti nel processo ad umido, e quindi non si ritiene necessario riportare i dati specifici già forniti nel capitolo precedente.

La popolazione microbica, come detto in precedenza, non proviene da particolari ceppi, ma si seleziona durante il periodo di acclimatazione. Anche in questo caso possono essere utilizzati ceppi batterici differenziati per diverse applicazioni: la popolazione microbica deve essere selezionata in funzione delle caratteristiche di composizione delle emissioni da depurare.

Generalmente la temperatura ideale per il funzionamento del sistema è quella ambiente; entro certi limiti, la popolazione microbica sopporta variazioni di temperatura, ma si ha di conseguenza una riduzione dell'efficienza di abbattimento.

In caso di variazioni brusche (soprattutto aumento) della temperatura, si può verificare una disattivazione della biomassa; i limiti di temperatura critici, dipendono dal ceppo attivo, dal sistema in cui è utilizzato e dalle condizioni operative di regime; se la temperatura non esce molto al di fuori dell'intervallo citato, è possibile che il sistema ritorni in attività mediante un periodo di acclimatazione, alla temperatura di progetto.

In seguito alla fase di irrorazione viene prodotto a valle dei letti un percolato che viene riciclato nello scrubber. L'acqua di processo per irrorare la superficie dei biofiltri viene riutilizzata senza trattamenti particolari, anche se mediamente ogni 6 mesi è necessario effettuare uno spurgo per garantire un corretto funzionamento del sistema. La manutenzione non necessita di interventi programmati da parte di personale specializzato, ma solo del mantenimento delle condizioni di umidificazione.

In tempi lunghi si può rendere necessario un rivoltamento della biomassa ed un intervento della ditta fornitrice sul supporto dei microrganismi o per reintegrare la stessa popolazione di microrganismi.

Questo intervento può essere necessario anche nel caso il sistema subisca shock termici o chimici che causino rispettivamente la degradazione fisica del supporto o la diminuzione di popolazione batterica vitale.

Al termine delle fasi di compostaggio e successiva vagliatura, il compost verrà trasferito in apposita area per la fase di maturazione lenta. Tale area è rappresentata da un capannone chiuso in struttura metallica avente una superficie planimetrica di circa 700 m². La superficie sarà suddivisa in tre piazzole pavimentate e delimitate con idonea muratura dove verranno stoccati i cumuli di compost. Circa un quarto dell'area sarà dedicata ad eventuale fase di vagliatura per l'ulteriore raffinazione del prodotto da immettere sul mercato.



Figura 5.4 Vagliatura del compost (Bekon (2013))

5.2 Impatti sull'ambiente e sicurezza

5.2.1 Quadro di riferimento della sicurezza

Gli effetti di tali impatti, vengono anche in questo caso valutati sia in fase di cantiere che fase di esercizio, tenendo presente che negli impianti di trattamento meccanico e biologico le principali problematiche di sicurezza e di prevenzione degli infortuni sono legate ai macchinari in uso.

Presso le stazioni di trattamento biologico sono di primaria importanza ai fini della sicurezza gli aspetti presentati in precedenza e di seguito riportati:

- esposizione alle polveri;
- esposizione alle endotossine;
- contatto con aerosol ed eventuali sostanze chimiche e tossiche;
- rumori;
- rischi connessi con l'uso delle macchine.

Per riaffrontare questa problematica si riporta nuovamente una sintesi dei rischi presenti:

- rischio biologico connesso con la presenza dei rifiuti;
- rischio di abrasioni con parti taglienti o similari contenuti nei rifiuti;
- rischio di incendio;
- rischio di inalazione di polveri durante le movimentazioni dei rifiuti;
- rischio rumore;
- rischi meccanici derivanti dalla presenza di macchine in movimento;
- rischi di investimento derivanti dalla presenza di macchine operatrici in movimento;
- rischi derivanti da uso improprio o non conforme dei macchinari;
- rischio chimico (per la potenziale formazione di composti chimici quali ammoniaca e idrogeno solforato nelle zone in cui avviene l'ossidazione del materiale organico);
- rischio di elettrocuzione derivante dalla presenza di apparecchiature elettriche.

Valgono allo stesso modo le misure e gli accorgimenti adottati per prevenire e ridurre i rischi per il personale addetto agli impianti, ed in particolare:

- impedire l'eccessiva disidratazione delle matrici organiche in corso di trattamento e del prodotto finale;
- umidificare il prodotto finale stoccato, a maggior ragione se da lungo tempo, prima di qualsiasi movimentazione;
- pavimentare le superfici di lavoro e la viabilità interna della stazione di trattamento;
- confinare, dove possibile, le operazioni di vagliatura e confezionamento del prodotto finale in strutture chiuse, dotate di sistema di aspirazione e filtrazione dell'aria;
- proteggere i lavoratori dall'esposizione alle polveri in coincidenza delle operazioni maggiormente responsabili della formazione di bioparticolato (es. rivoltamento dei cumuli), usando macchine operatrici a cabina chiusa e climatizzata;
- applicare sistemi di trattamento ad aerazione forzata della matrice in trasformazione piuttosto che basati sul rivoltamento periodico dei cumuli.

Mentre i rifiuti organici di origine vegetale presentano una modesta carica di microrganismi potenzialmente patogeni per l'uomo (che risulta poi del tutto assente quando si considerano i materiali che fungono da strutturante), il quadro cambia nel caso di trattamento del digestato derivante dal processo di digestione.

Poiché quest'ultimo contiene un'elevatissima concentrazione di organismi patogeni, si richiederà, da parte degli operatori, un'osservanza maggiormente scrupolosa delle normali misure di sicurezza (es. uso di indumenti da lavoro adatti, lavaggio delle mani prima di toccare cibi e bevande o gli occhi, etc.).

Uno degli aspetti più critici nella manipolazione del digestato, specialmente quando questo viene impiegato nella preparazione delle miscele di partenza per il trattamento anaerobico, è rappresentato dalla possibile formazione e dispersione di aerosol trasportatori di agenti patogeni.

Le micro gocce sospese nell'aria, contenenti cellule microbiche o particelle virali, costituiscono un veicolo potenziale di infezione, nei confronti del quale è stato previsto il confinamento al chiuso delle operazioni di miscelazione fra la FORSU e il digestato, e l'impiego di apposite maschere e guanti da parte degli operatori addetti alla manipolazione della miscela.

Le varie fasi di pretrattamento e avvio alla digestione anaerobica, così come descritte in precedenza, mirano principalmente automatizzare il più possibile il ciclo di pretrattamento della FORSU, a vantaggio della sicurezza sui luoghi di lavoro e dell'ambiente, limitando gravose movimentazioni dei sottoprodotti, con confinamento della FORSU e la lavorazione in un'unica area (ricezione, pretrattamento e miscelazione) dotata di opportuni presidi ambientali per il trattamento dell'aria e dello sversamento accidentale del percolato.

Le aree relative al conferimento, al pretrattamento e alla miscelazione dei substrati sono tenute costantemente in depressione da un sistema di aspirazione che provvede a ricambiare l'aria almeno 4 volte l'ora. L'aria aspirata viene inviata anche in questo caso ad un impianto di depurazione / deodorizzazione dotato di scrubber e biofiltro.

Il sistema così definito è stato ottimizzato per consentire l'alimentazione dell'impianto in automatico, praticamente senza alcun intervento da parte dell'unico operatore, quindi con notevole vantaggio ai fini della sicurezza.

Per la gestione del biogas, in nessuna fase operativa può verificarsi la formazione di miscele gassose a rischio di esplosione. Prima dell'apertura del digestore viene effettuato lo svuotamento preventivo del biogas presente all'interno per evitare che l'ingresso di aria dall'esterno possa determinare la formazione di una miscela esplosiva. Allo scopo è stato previsto un sistema di insufflazione di gas inerte e, solo dopo che nell'atmosfera del digestore non è più presente metano, si sbloccano i chiavistelli di chiusura del portellone. Il software di controllo elabora quindi i dati rilevati e regola l'apertura e la chiusura del portellone frontale, rendendola possibile esclusivamente quando la concentrazione di metano all'interno del digestore scende sotto la soglia potenzialmente pericolosa, eliminando i rischi di apertura accidentale (errore degli operatori).

Come soluzione migliorativa per ridurre al minimo il rischio di esplosioni è previsto inoltre il continuo monitoraggio delle concentrazioni di CH₄, CO₂, O₂ e H₂S nei punti cruciali dell'impianto, in modo da tenere sotto controllo lo stato del processo e, di conseguenza, la comparsa di eventuali anomalie.

La composizione del biogas che alimenta il sistema di cogenerazione sarà monitorata in continuo per mezzo del software di controllo, al fine di evitare malfunzionamenti dei motori, ed in caso di caratteristiche non idonee del gas una valvola di blocco avvierà i gas direttamente in torcia.

Nel caso in cui il biogas non possa essere alimentato al cogeneratore, può essere bruciato in condizioni controllate tramite un dispositivo a torcia del tipo a fiamma contenuta.

Per quanto riguarda la digestione aerobica, particolare attenzione andrà posta al rischio di incendio, per contenere il quale, si farà in modo che il materiale in trasformazione venga sempre mantenuto con livelli di umidità tali da evitare rischi di combustione spontanea, che, seppure limitati, vanno tenuti in debita considerazione.

Inoltre, onde evitare una eccessiva disidratazione, si farà in modo che le matrici organiche in corso di stabilizzazione non raggiungano altezze di accumulo superiori a 3,00 metri, in modo da evitare l'autocombustione.

Ulteriori accorgimenti meritevoli di nota in materia di sicurezza che vengono garantiti dalla tecnologia scelta per l'impianto a secco sono:

1. i portelloni e la struttura dei reattori sono progettati per lavorare con una sovrappressione interna elevata; questa scelta progettuale permette di lavorare in massima sicurezza anche se si dovesse, per qualunque motivo, verificare una perdita di gas;
2. i digestori sono dotati di un sistema di aspirazione dell'aria di processo in grado di creare e mantenere al loro interno condizioni idonee all'ingresso degli operatori;
3. il sistema di chiusura dei reattori si avvale di catenacci pneumatici con blocco di sicurezza, il cui sblocco può essere comandato esclusivamente dal software di gestione.

5.2.2 Quadro di riferimento ambientale

Si riportano nuovamente per chiarezza di esposizione le componenti analizzate, articolate nei possibili recettori di impatto che le caratterizzano:

ATMOSFERA

- *Qualità dell'aria* valutata per i principali inquinanti monitorati;
- *Odori* valutati localmente.

AMBIENTE IDRICO

- *Qualità delle acque superficiali*;
- *Qualità delle acque sotterranee*: qualità delle acque sotterranee nell'area dell'impianto;
- *Consumi idrici*: si fa riferimento ai prelievi dalla fonte di approvvigionamento.

SUOLO E SOTTOSUOLO

- *Geomorfologia*: intesa come modifica della situazione geomorfologica dei siti in relazione alla presenza dell'impianto;
- *Idrogeologia*: si intende le interferenze con l'assetto idrogeologico del sito dove si realizzeranno le opere;
- *Rischio idraulico*: valutazione delle possibili interferenze nella realizzazione del progetto in riferimento alla pericolosità idraulica del luogo;
- *Permeabilità dei suoli* nell'area delimitata dal perimetro dell'impianto.

VEGETAZIONE, FLORA E FAUNA - ECOSISTEMI

- *Superfici vegetate* nei pressi dell'impianto;
- *Disturbo alla fauna* nei pressi dell'impianto;
- *Frammentazione di habitat* nei pressi dell'impianto.

COMPONENTI ANTROPICHE

- *Livelli sonori*: inquinamento acustico locale;
- *Traffico*: incidenza dell'esercizio dell'impianto sul traffico esistente nei pressi dell'area;
- *Energia*: incidenza nel consumo/produzione di energia del processo di biodigestione;
- *Rifiuti*: incidenza del processo nel ciclo di gestione dei rifiuti;
- *Pubblica utilità*: soddisfacimento della necessità di smaltimento rifiuti.

a) Impatti e mitigazioni in fase di cantiere

La fase di cantiere risulta anche in questo caso limitata perché si riferisce alla realizzazione delle opere edili ed impiantistiche a servizio dell'insediamento. Durante la fase di cantiere, gli impatti sono limitati in quanto di durata temporale breve, di estensione limitata e dovuti ai tipici disturbi legati ad un cantiere edile.

Nello specifico si riscontrano gli stessi fattori di impatto, definiti singolarmente in precedenza, sulle varie componenti analizzate, essendo le fasi di cantiere analoghe sotto tutti i punti di vista per la realizzazione di un impianto a umido e di uno a secco.

b) Impatti e mitigazioni in fase di esercizio

Atmosfera: Le potenziali emissioni in atmosfera possono derivare, come visto in precedenza, da:

- biofiltri nella fase di digestione;
- emissioni odorigene, provenienti dalle sale di conferimento del materiale organico, oltre che dalle sale di pretrattamento e di miscelazione;
- motori di cogenerazione;
- mezzi in ingresso e uscita dall'impianto;
- stoccaggio del verde;
- torcia.

Durante le fasi di trattamento dei rifiuti organici si genera un impatto negativo modesto dovuto a monossido di carbonio, ossidi di azoto e di carbonio organico totale dai camini dei motori dei cogeneratori, polveri derivanti dalla triturazione del verde e delle ramaglie e dalla fase di raffinazione del compost.

Gli impatti generati dalla fase di combustione del biogas sono mitigati, utilizzando un sistema di post combustione dei fumi dei cogeneratori, attraverso cui sono abbattute le emissioni di monossido di carbonio e di idrocarburi non metanici. Con tale sistema si assicura un'adeguata depurazione dei fumi tali da rispettare i limiti imposti dal D.lgs. 152/2006.

Le emissioni di polveri provenienti dalla fase di triturazione si ritengono limitate all'intorno più prossimo dell'impianto.

Si potranno verificare emissioni di polveri dalla fase di vagliatura del compost, anche in questo caso l'attività sarà eseguita al coperto e ci sarà una diffusione di polveri limitatamente all'intorno dell'ambito senza raggiungere ricettori sensibili.

Le emissioni di tipo diffuso sono essenzialmente legate a sostanze odorigene e polveri legate alla fase di conferimento dei rifiuti alle operazioni di triturazione dei rifiuti ligno-cellulosici e alle emissioni provenienti dai biofiltri.

Anche in questo caso si prevede il lavaggio all'interno dell'impianto dei mezzi in entrata che trasportano i rifiuti organici putrescibili, che, di conseguenza, non rilasciano odori nel tragitto per il conferimento dei rifiuti. Tale trattamento ovviamente non risulta necessario per i mezzi in entrata che conferiscono il materiale legnoso che funge da strutturante per il processo.

Inoltre, il sistema di trattamento dell'aria di ricambio interna e l'utilizzo di *scrubber* e biofiltri permette l'assorbimento e l'ossidazione biologica dei composti chimici dal flusso dell'aria.

Ambiente idrico: Gli impatti potenziali dei corpi superficiali e delle falde derivano dall'inquinamento dal percolato e delle acque di dilavamento dei piazzali che possono trasportare eventuali sostanze inquinanti.

Al fine di ridurre al minimo gli impatti negativi sull'ambiente e di salvaguardare il più possibile le acque superficiali e di falda, i liquidi di processo, insieme alla condensa del locale di compostaggio e dall'impianto di trattamento aria, sono inviati al riutilizzo (previo trattamento di depurazione). In fase di compostaggio il percolato prodotto verrà nebulizzato sui cumuli in maturazione al fine di agevolare il processo di digestione aerobica.

A maggior garanzia di contenimento delle sostanze inquinanti, sono previsti due serbatoi di accumulo da 50 m³ ciascuno, che permettono periodicamente di mandare a depurazione esterna ogni 20 giorni i liquidi in uscita dall'impianto di disidratazione delle acque di processo.

Per quanto riguarda le acque di prima pioggia il progetto prevede lo stoccaggio in una vasca di accumulo, da dove poi verranno trattate e riutilizzate nel ciclo produttivo e per l'irrigazione delle aree a verde e lavaggio dei piazzali.

Le aree di deposito coperte e pavimentate impediscono il verificarsi di qualsiasi impatto negativo sulle acque sotterranee, che vengono altresì preservate con tutti gli accorgimenti tecnico-progettuali, relativi ai serbatoi di stoccaggio dei liquidi di processo, necessari per evitare fessurazioni.

Inoltre, il software di controllo consente di riconoscere nell'immediato eventuali anomalie degli impianti, consentendo l'intervento degli operatori.

I consumi idrici per il processo a secco sono ridotti al minimo, in quanto per l'umidificazione dei rifiuti in digestione si riutilizzerà il percolato, le acque di prima pioggia e di seconda pioggia. Altri utilizzi di acqua sono previsti per il reintegro dello scrubber a umido a monte del biofiltro, e per l'umidificazione del biofiltro.

Per quanto possibile, in generale sarà massimizzato il riutilizzo delle acque di seconda pioggia. Le acque di prima pioggia saranno trattate con un sistema del *tipo chimico fisico* attraverso il quale saranno chiarificate le acque ed avviate alle vasche interrate per essere all'occorrenza riutilizzate per approvvigionare i biofiltri e gli scrubber; mentre i fanghi in uscita dalla fase di trattamento chimico fisico saranno inviati a depurazione esterna.

Suolo e sottosuolo: Dal punto di vista geomorfologico e idrogeologico non vi sono anche in questo caso impatti degni di nota, e per quanto riguarda il rischio idraulico si stima un impatto negativo modesto in quanto la superficie impermeabilizzata presente non va ad interferire con la situazione idraulica della zona.

Vegetazione, flora e fauna ed ecosistemi: L'area non è interessata da siti naturalistici di interesse, ed è caratterizzata da vegetazione spontanea; inoltre i soli effetti rilevabili sulla vegetazione sono riconducibili alle emissioni di gas e polveri. Essendo queste ridotte, si ritengono tali impatti trascurabili.

Per la fauna non si prevede perdita di habitat e di spazio disponibile. L'aumento di traffico e l'esercizio dell'impianto genera un impatto negativo modesto sulla fauna presente a causa della variazione dei livelli di rumore.

Livelli sonori: Secondo una valutazione delle emissioni sonore relative agli impianti si verifica che l'opera rispetta i livelli di emissione e di immissione ai ricettori sensibili, anche grazie a *schermi acustici* nell'intorno delle aree ove sono utilizzate apparecchiature con un livello di potenza sonora ragguardevole (ad esempio il tritatore).

I cogeneratori sono collocati all'interno di una struttura fonoassorbente che ne riduce drasticamente le emissioni sonore e sono dotati di silenziatori sia nei condotti di emissione dei flussi gassosi esausti, sia nelle eventuali aperture laterali della struttura fonoassorbente per l'ingresso di aria comburente e per l'uscita dell'aria di ricircolo.

Per la fase di conferimento rifiuti si stima un impatto negativo modesto generato dal traffico in ingresso e uscita.

Traffico: In fase di esercizio all'impianto confluiranno gli automezzi di raccolta e trasporto della FORSU e del materiale strutturante. In uscita, oltre agli stessi autocompattatori ed automezzo vuoti, ci saranno i mezzi adibiti al trasporto delle frazioni organiche compostate, destinate alla commercializzazione, e le frazioni da destinare allo smaltimento in discarica.

I flussi veicolari previsti durante il normale esercizio dell'impianto sono modesti, in considerazione del traffico della zona.

Energia: L'impianto genera un impatto positivo rilevante in quanto attraverso la cogenerazione a biogas, prodotto dalla digestione anaerobica dei rifiuti, si genera energia elettrica rinnovabile in quantità tale da poter essere utilizzata in parte per gli auto consumi ed in parte per immetterla in rete.

Rifiuti: In termini di smaltimento di rifiuti si stima un impatto positivo in quanto il rifiuto umido dei comuni conferenti, tra cui il comune di Molfetta tra i maggiori, potrà essere trattato in un impianto baricentrico rispetto alla produzione, con una riduzione economica per il trattamento.

L'impianto inoltre produrrà compost che potrà essere suddiviso in una parte distribuita ai comuni conferitori come ammendante per la sistemazione delle aree verdi, e la restante come compost fuori specifica che sarà inviato a discarica come materiale di copertura.

I rifiuti prodotti dalle lavorazioni all'interno dell'impianto sono i seguenti :

- *scarti di sopravaglio* dalla raffinazione finale del compost smaltiti in discarica;
- *compost fuori specifica*, che sarà smaltito e/o riutilizzato come terreno di ricopertura in discarica;
- *acque di prima pioggia e percolato* in eccesso, che saranno smaltiti presso impianti autorizzati;
- *fango in uscita dalla fase di trattamento chimico fisico*, prodotto in quantità evidentemente minori nel processo a secco, da avviare a smaltimento;
- *oli dei motori e dei mezzi*, che saranno stoccati in contenitori specifici e conferiti ad impianti specializzati e/o conferiti al consorzio obbligatorio.

Tali rifiuti non saranno prodotti in quantità elevata e di conseguenza generano un impatto trascurabile.

Pubblica utilità: La realizzazione di tale impianto genera un impatto positivo rilevante in quanto permette l'autosufficienza dei comuni conferitori nello smaltimento dei rifiuti, ed inoltre risponde anche alla necessità della prossimità dell'impianto agli stessi. La realizzazione di questo impianto permette, infatti, di ridurre notevolmente il tragitto per il conferimento dei rifiuti presso l'impianto di recupero, nonché di eliminare la necessità di apporto di acqua esterna, con tutte le semplificazioni di processo e le riduzioni di ingombri e di macchinari definite in precedenza.

5.3 Gestione e manutenzione

Le attività di gestione dei rifiuti che si svolgeranno nell'impianto a secco riprendono evidentemente sotto la maggior parte degli aspetti di interesse quanto già evidenziato nella descrizione del processo ad umido.

Esse seguiranno anche in questo caso i principi generali di rispetto della salute, della sicurezza e del benessere della collettività, necessari per garantire le esigenze igienico sanitarie della zona di interesse.

Si ritiene utile in questa sede di andare a riprendere solo alcuni aspetti dei numerosi visti in precedenza, con la finalità di porre l'accento solo sulle differenze realmente esistenti fra i due tipi di impianto, che comunque risulteranno limitate per quanto attiene alle operazioni di gestione e manutenzione dell'impianto.

Per quanto riguarda la gestione dei **residui solidi** (compost di qualità, compost da rifiuti, scarti organici non completamente compostati, scarti vari non comportabili, sovralli residuanti dai rifiuti urbani indifferenziati) valgono le considerazioni fatte in precedenza.

Per quanto attiene alla gestione di tutti i **residui liquidi** (percolati e acque meteoriche) è necessario e sufficiente eseguire con ordine ed in modo completo tutti gli interventi di manutenzione e monitoraggio ordinariamente richiesti sulle opere idrauliche e definiti nel capitolo precedente.

Meritevole di nota è la riduzione di tutti i residui liquidi di processo grazie alla tecnologia a secco, con ricircolo completo dei percolati e riutilizzo delle acque di pioggia.

Il Gestore si farà naturalmente carico delle necessarie attività di disinfezione, disinfestazione e derattizzazione secondo il programma che verrà stabilito dalla A. S. L. e secondo le prescrizioni già descritte. Inoltre è tenuto a predisporre e tenere in funzione una stazione di rilevamento dei parametri meteorologici di interesse; il Gestore provvederà altresì al prelievo di campioni di aria nelle immediate vicinanze dell'impianto ed alla relativa analisi chimica per l'individuazione di sostanze odorigene.

In tabella 5.1 vengono sinteticamente riportati i principali vantaggi per quanto attiene alla gestione e manutenzione dell'impianto a secco rispetto a quello con tecnologia ad umido, e le principali differenze tra i due tipi di impianti, con specifico interesse alle agevolazioni di gestione e manutenzione dei vari processi a secco.

Pretrattamento

Semplificazione del processo	
Le operazioni di pretrattamento si riducono alla sola vagliatura del materiale in ingresso e alla successiva miscelazione con lo strutturante prima di avviare la miscela alla fase di digestione anaerobica.	<ul style="list-style-type: none">- Impiego di un solo operatore per la supervisione del trattamento di vagliatura altamente automatizzato- Scarto e perdita di materia organica inferiore e conseguente aumento della producibilità di biogas- Interventi manutentivi ridotti
Localizzazione aree ricezione rifiuti e pretrattamento	
Le aree di ricezione rifiuti e miscelazione vengono localizzate in un unico capannone, che consente una riduzione delle zone di movimentazione del materiale. Viene ottimizzato in questo modo il sistema di depurazione dell'aria interna, poiché si evita un eccessivo sviluppo delle tubazioni di aspirazione e mandata collegate con il sistema scrubber / biofiltro. Si riduce, inoltre, la dispersione di odori e di materiale solido e liquido nel trasferimento da una fase del processo all'altra, riducendo notevolmente gli impatti.	<ul style="list-style-type: none">- L'accorpamento delle aree di movimentazione dei rifiuti determina l'impiego di un solo operatore nella attività di alimentazione materiale, oltre che la riduzione dei tempi nelle fasi di movimentazione- La riduzione delle tubazioni di aspirazione e mandata implica operazioni di manutenzione di durata inferiore- Rapida pulizia degli scrubber tramite svuotamento corpi filtranti e successiva sostituzione
Pulizia dei mezzi gommati in ingresso	
Al termine delle operazioni di conferimento dei rifiuti, è prevista l'installazione di un sistema di lavaggio dei mezzi gommati al fine di ridurre lo spandimento di materiali inquinanti nella rete viaria dell'impianto.	<ul style="list-style-type: none">- Il sistema automatico di lavaggio riduce la presenza di operatori- Garantisce condizioni di salubrità e pulizia- Riduzione dei tempi di pulizia della rete viaria

Digestore anaerobico

Sistema di riscaldamento del substrato	
<p>La struttura è realizzata in cemento armato e integrata con pannelli in materiale isolante per un'elevata coibentazione. All'interno sono annegati i riscaldatori costituiti da tubi in PE con barriera antiossidante, alimentati ad acqua per il riscaldamento della massa.</p> <p>La distribuzione del percolato, preventivamente riscaldato mediante scambiatore di calore, sulla biomassa ha anche la funzione di mantenimento della temperatura mesofila.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Consumo di energia inferiore- Garanzia di mantenimento del regime mesofilo grazie al controllo del software di controllo
Sistema di alimentazione delle acque di processo	
<p>Nel processo a secco non è necessario l'approvvigionamento d'acqua dalla rete pubblica, che comporterebbe un costo che renderebbe non sostenibile il processo di digestione anaerobica. La miscela in uscita dai digestori infatti ha un tenore di sostanza secca che rende inutile una disidratazione preliminare alla successiva fase di compostaggio.</p> <p>Questa soluzione, oltre a ridurre i costi di acquisto di acqua dalla rete, permette di abbattere gli impatti dovuti all'immissione ed al successivo smaltimento della portata d'acqua di alimentazione.</p> <p>Sono in questo caso sufficienti i soli ricircoli di parte del digestato e del percolato anaerobico.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Eliminazione della portata d'acqua dalla rete pubblica- Sistema automatico di recupero delle acque- Personale operativo legato ad attività di sola supervisione- Eliminazione dell'attività di smaltimento dell'acqua di immissione
Digestori anaerobici in parallelo	
<p>La digestione a secco viene condotta in batterie di reattori in parallelo anziché in un unico digestore.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Maggiore flessibilità operativa- Viene scongiurato il rischio di blocco totale della produzione di energia in caso di interruzioni del processo biologico

Depurazione dell'aria di processo	
<p>I digestori sono provvisti di un sistema d'aerazione forzata che consente l'aspirazione dell'aria all'interno del reattore per aspirare le emissioni gassose maleodoranti nelle fasi di riempimento e svuotamento.</p> <p>Una valvola motorizzata a tenuta di gas è posta tra la condotta principale di aspirazione ed il condotto di ripresa dal reattore.</p> <p>L'aria aspirata verrà avviata al biofiltro per la sua purificazione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema di aspirazione autonomo e indipendente - Sicurezza per gli operatori nelle fasi di carico e scarico dei digestori - Riduzioni dei rischi di emissioni maleodoranti nelle zone limitrofe - Biofiltro strutturato in moduli separati, autonomamente funzionanti, tali da rimanere in esercizio qualora uno di essi sia fermo per attività di manutenzione

Cogeneratore

Torcia di combustione biogas	
Installazione di una torcia a fiamma ritenuta che consente la combustione del biogas in condizioni di emergenza.	<ul style="list-style-type: none"> - Elevato livello di sicurezza per via del totale contenimento della fiamma
Impianto di cogenerazione da biogas	
Installazione di due motori.	<ul style="list-style-type: none"> - Maggiore flessibilità, poiché l'uso di due motori permette di coprire eventuali manutenzioni di una delle due unità - Riduzione del personale manutentivo - Possibilità di intervento su un gruppo in "ombra" al secondo, evitando il fermo impianto

Compostaggio

Trattamento di compostaggio	
Il materiale che giunge a compostaggio risulta di ottima qualità, in quanto la sostanza organica non viene ridotta o alterata nei ridotti processi di pretrattamento.	<ul style="list-style-type: none"> - Compost di ottima qualità direttamente sfruttabile come ammendante agricolo - Migliore controllo e a costi

<p>E' prevista la realizzazione di 2 setti di separazione in c.a. per differenziare le corsie di maturazione in 4 comparti stagni, tali da rendere facilmente distinguibili e gestibili i cumuli in coltivazione.</p> <p>Per la vagliatura, si utilizza un vaglio rotante con porte d'ispezione insonorizzate che riducono notevolmente gli impatti acustici.</p> <p>Per la sicurezza, l'unità di comando è equipaggiata con un sistema d'allarme e di protezione che disinserisce il motore in caso di interruzioni accidentali.</p> <p>Per abbattere le polveri e le sostanze azotate ed ammoniacali in eccesso sono previsti scrubber a monte dei biofiltri.</p>	<p>minori delle emissioni gassose (raccolte assieme alla CO₂ nella fase di digestione anaerobica)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Migliorato controllo e gestione cumuli in coltivazione - Minori costi per il mantenimento degli standard di sicurezza - Protezione automatica da eventuali interruzioni di corrente - Garanzia di riduzione degli organismi patogeni grazie al doppio passaggio termico - Facilità nella attività manutentive dei dispositivi di filtrazione (scrubber)
---	--

Tabella 5.1 vantaggi della gestione e manutenzione dell'impianto a secco rispetto a quello con tecnologia ad umido

Il Gestore è tenuto a tenere costantemente informate le Pubbliche Amministrazioni interessate, del regolare andamento della gestione nonché delle eventuali situazioni anomale che si dovessero verificare; inoltre deve assicurare che tutti i presidi igienici sanitari presenti nell'impianto siano mantenuti in perfetta efficienza e fornirà al personale utilizzato nell'impianto tutti i necessari dispositivi di protezione.

Il lavaggio degli impianti verrà eseguito come definito in precedenza.

L'attività gestionale dell'impianto deve essere organizzata tenendo conto della tipologia dei rifiuti che dovranno essere trattati e delle caratteristiche del metodo di trattamento.

All'impianto potranno essere conferiti esclusivamente:

- rifiuti con matrice legnosa ammessi alla funzione di materiale strutturante;
- rifiuti solidi urbani misti, residuali dalle attività di raccolta differenziata;
- rifiuti solidi urbani provenienti dalla raccolta differenziata della frazione organica;
- rifiuti speciali non pericolosi assimilati agli urbani;
- rifiuti ammessi alla produzione di compost con l'applicazione di procedure semplificate;
- rifiuti compostabili non pericolosi.

Eventuali ampliamenti delle categorie di rifiuti ammesse all'impianto dovranno essere autorizzati dalla Provincia. I rifiuti conferiti all'impianto dovranno, in ogni caso, essere privi di rifiuti ingombranti, beni durevoli, rifiuti pericolosi.

a) La gestione operativa comprende l'esecuzione di controlli di processo, oltre che sui rifiuti in ingresso e sui prodotti ottenuti al termine del processo. I controlli sistematici devono essere effettuati su tutti i carichi in arrivo e consistono nell'ispezione visiva dei rifiuti.

I controlli di processo, durante tutte le fasi dell'attività di gestione dei rifiuti, sono finalizzati a

verificare il corretto procedere dei fenomeni ossidativi, identificare tempestivamente, grazie all'apposito software di controllo, eventuali anomalie e apportare in tempo utile i correttivi necessari.

La tipologia di processo adottata nell'impianto richiede il controllo dei seguenti parametri:

temperatura, umidità, tenore di ossigeno e pH (limitatamente alla produzione di compost di qualità).

Il Gestore dovrà provvedere alla identificazione di ciascun cumulo di rifiuti, registrandone le dimensioni, la tipologia dei rifiuti utilizzati e l'eventuale miscelazione di diverse matrici.

b) In presenza di "*situazioni non ordinarie*", gli obiettivi da conseguire sono l'eliminazione di rischi per le persone, l'eliminazione di rischi per le cose e il ritorno alla "situazione ordinaria". Per tutto quanto attiene alle misure da attuare in caso di "*anomalie operative*" e **gestione delle emergenze** si rimanda a quanto già detto diffusamente in precedenza.

c) Controlli analitici sui rifiuti in ingresso: Periodicamente, sulle diverse tipologie di rifiuti conferiti dai diversi produttori, vengono eseguiti, a campione, dei controlli analitici di caratterizzazione chimica.

Con riferimento ai *rifiuti solidi urbani misti*, i controlli a campione devono essere finalizzati ad accertare l'assenza di rifiuti non compatibili con i trattamenti eseguiti nell'impianto.

Con riferimento ai *rifiuti organici selezionati*, provenienti da raccolta differenziata di rifiuti solidi urbani, i controlli a campione devono essere finalizzati ad accertare la compatibilità dei rifiuti rispetto alla produzione di compost di qualità.

Pertanto dovranno essere determinati :

- il pH e l'umidità dei rifiuti;
- la presenza di materiali indesiderabili (plastica, metalli) o di inerti (lapidei, polveri);
- la presenza di metalli pesanti;
- altri parametri significativi.

Il Gestore, nella stesura dei rapporti periodici, dovrà rilevare le correlazioni tra rifiuti in ingresso e caratteristiche qualitative del compost; ogni caso avrà facoltà di sospendere l'accettazione dei rifiuti per i quali vi sia evidenza di incompatibilità con la produzione di compost di qualità.

d) Controlli sul processo di compostaggio: Il sistema di controllo automatico del processo di trattamento dovrà consentire la gestione di tutti i parametri rilevanti per lo svolgimento delle diverse fasi di bio-ossidazione : *temperatura; ossigeno; umidità; pH.*

Conseguentemente le verifiche operative di processo devono accertare che non vi siano anomalie di funzionamento nel sistema.

e) Controlli sulla produzione di biogas: Il controllo consiste nella verifica qualitativa del biogas prodotto dalla sezione di digestione anaerobica.

f) Piano generale delle manutenzioni: Il Gestore è tenuto ad eseguire le verifiche periodiche richieste dai libretti di uso e manutenzione di tutte le macchine ed impianti ed a garantire il perfetto funzionamento delle stesse, così da prevenire inconvenienti nello svolgimento del servizio. Egli ha inoltre il compito di monitorare costantemente lo stato delle strutture, degli impianti, delle macchine operatrici e delle attrezzature utilizzate nel processo.

Per la manutenzione ordinaria dell'impianto il Gestore predisporrà un programma di manutenzione che sarà integrato dagli interventi occasionali e straordinari che si renderanno necessari. Il piano delle manutenzioni riguarda tutte le componenti già elencate in precedenza.

5.4 Piano economico finanziario, computo metrico estimativo e business plan

5.4.1 Analisi dei costi di gestione impianto di digestione anaerobica a secco

Caratteristiche tecniche dell'impianto

Quantità conferita di FORSU ----->	29.000 ton/anno
Quantità conferita di strutturante ----->	10.950 ton/anno
FORSU raccolta alla fonte (scarti 5%) ----->	14.600 ton/anno
FORSU da raccolta domestica (scarti 5%) ----->	14.600 ton/anno
Cessione compost di qualità ----->	14.900 ton/anno
Energia elettrica prodotta ----->	9.216.856 Kwh/anno
Energia termica prodotta ----->	5.588.705 Kwh/anno
Fabbisogno di energia termica ----->	1.383.958 Kwh/anno
Surplus di energia termica ----->	4.204.747 Kwh/anno

Composizione dell'impianto

L'impianto è composto dalle seguenti sezioni:

- sezione ricezione e stoccaggio;
- sezione pretrattamento meccanico;
- sezione digestione anaerobica;
- sezione cogenerazione e trattamento biogas;
- sezione trattamento del digestato;
- sezione compostaggio.

Sono integrati i seguenti sistemi ausiliari:

- sala controllo e automazione;
- impianti elettrici;
- reti ausiliarie;
- reti di collegamento acque di processo.

Analisi dei costi di gestione

Di seguito si descrivono analiticamente i costi relativi alla gestione dell'impianto proposto.

Personale: Il calcolo dei costi relativi al personale viene eseguito sull'esercizio dell'impianto tenendo conto delle figure necessarie.

PERSONALE	N°	COSTO ANNUO	TOTALE COSTI ANNUI
Unità specializzate	3	€ 42.000,00	€ 126.000,00
Unità operative	5	€ 32.000,00	€ 135.000,00
Totale personale	8		€ 261.000,00

Manutenzioni: Per la stima dei costi di manutenzione saranno stimati quelli relativi alle manutenzioni ordinarie e alle manutenzioni straordinarie previste.

Manutenzione Ordinaria: E' rappresentata da quelle attività manutentive semplici, a cura del personale addetto alla gestione, che hanno lo scopo di preservare nel tempo macchine ed impianti.

Manutenzione Straordinaria: E' rappresentata da attività specifiche differenti da quelle previste per la manutenzione ordinaria ed è eseguita da personale specializzato dotato di conoscenza specifiche, documentazione e ricambi.

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE PRETRATTAMENTO	VALORE IN €/ANNO
1	Trituratore aprisacchi	9.200,00
2	Nastro trasportatore	1.600,00
3	Vaglio rotante	4.200,00
4	Nastri trasportatori in gomma	2.000,00
5	Spremitrici	0,00
6	Coclea	0,00
7	Pompa sollevamento purea	0,00
8	Cassoni	300,00
9	Biofiltro	2000,00
10	Ventilatore	1000,00
11	Scrubber	2200,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE PRETRATTAMENTO		22.500,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE DIGESTIONE ANAEROBICA	VALORE IN €/ANNO
1	Vasche di precarica	0,00
2	Scambiatori di calore	1.000,00
3	Digestione anaerobico	10.000,00
4	Copertura	0,00
5	Ricircolo biogas	0,00
6	Sistemi di sicurezza	1.500,00
7	Impianto di depurazione biogas	2.000,00
8	Torcia	600,00
9	Motori cogenerazione	12.000,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE DIGESTIONE ANAEROBICA		27.100,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE SEZIONE TRATTAMENTO REFLUI	VALORE IN €/ANNO
1	Centrifuga	0,00
2	Impianto di depurazione	0,00
3	Pompe di ricircolo	0,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE TRATTAMENTO REFLUI		0,00

Pos.	STIMA MANUTENZIONE STRAORDINARIA SEZIONE COMPOSTAGGIO	VALORE IN €/ANNO
1	Biofiltro	4.100,00
2	Scrubber	4.800,00
3	Impianto di insufflazione aria	1.500,00
4	Vaglio rotante	3.200,00
5	Pala meccanica	4.500,00
6	Ventilatori	1.500,00
TOTALE MANUTENZIONI SEZIONE COMPOSTAGGIO		19.600,00

RIEPILOGO COSTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA ANNUA		VALORE IN €
Pos.	SEZIONE	
1	Impianto di trattamento	22.500,00
2	Impianto di digestione anaerobica	27.100,00
3	Impianto di trattamento reflui	0,00
4	Impianto di compostaggio	19.600,00
5	Impianti vari	20.000,00
TOTALE MANUTENZIONE STRAORDINARIA		89.200,00

Il costo totale anno per manutenzioni straordinarie sarà pari a € 89.200,00.

Energia elettrica: In riferimento ai consumi di energia elettrica si fa riferimento allo schema funzionale.

SEZIONE	POTENZA INSTALLATA	COEFF. FUNZIONALITA'	h/gg	kW/g g	gg/anno	kW/anno
Pretrattam.to	90	0.55	4	198	330	65.340
Digestione anaerobica	22	0.50	24	264	330	87120
Trattamento reflui	0	0.64	24	0	330	0
Compostaggio	250	0.52	24	3120	330	1.029.600
TOTALE CONSUMI ENERGIA ELETTRICA				3.582	330	1.182.060

Il consumo annuo totale sarà pari a 1.182,06 MW/ anno .

Il costo stimato dell'energia, benché prodotta dall'impianto sarà pari a:

$1.182.060 \times 0.12 \text{ €/kW} = 141.847,20 \text{ €/anno}$.

Consumo combustibili: I consumi di combustibili sono essenzialmente legati alle macchine operatrici impiegate per l'alimentazione alla sezione di pretrattamento, nonché alla gestione e movimentazione dei cumuli per l'impianto di compostaggio e l'allontanamento dei cassoni scarrabili.

CONSUMO COMBUSTIBILI						
Macchine operatrici	N.	lt/h	h/gg	gg/anno	€/lt	€/anno
Pala gommata	3	12	4	330	1,70	80.784,00
Autocarro	2	6	2	330	1,70	13.464,00
TOTALE CONSUMO COMBUSTIBILI						94.248,00

Materiali di consumo

MATERIALI DI CONSUMO E RICAMBI	€/anno
Ricambi usura	50.000,00
Materiali di consumo	25.000,00
Varie	15.000,00
TOTALE MATERIALI DI CONSUMO E RICAMBI	90.000,00

Analisi dei costi di disinfestazione e disinfezione

Viene stimato un costo annuo per i servizi di disinfestazione per € 9.000,00.

Costi di smaltimento: Vengono analizzati i costi di smaltimento dei rifiuti e dei rifiuti prodotti dall'impianto.

RIFIUTI	COSTO ANNUO
– FRAZIONE SECCA 10 t/gg x 330 gg/anno x 120 €/ton	396.000,00
– REFLUI DA SMALTIRE 0 m ³ /gg x 330 gg/anno x 40 €/m ³	0,00
TOTALE SMALTIMENTI	396.000,00

Spese tecniche di gestione

– Consulenze tecniche	38. 000,00
– Consulenze sicurezza	10. 000,00
– Consulenze legali	8. 000,00

TOTALE SPESE TECNICHE	56.000,00
------------------------------	------------------

Spese assicurative

– Assicurazioni RG.RCO	8. 000,00
– RC Inquinamento	12. 000,00
– All Risks	15. 000,00

TOTALE SPESE ASSICURATIVE	35.000,00
----------------------------------	------------------

La struttura dei costi di gestione dell'impianto è la seguente:

STRUTTURA DEI COSTI	€/anno
PERSONALE	261.000,00
MANUTENZIONI	89.200,00
COMBUSTIBILI	94.248,00
MATERIALI DI CONSUMO	81.000,00
COSTI DI SMALTIMENTO	396.000,00
SPESE TECNICHE	56.000,00
SPESE ASSICURATIVE	35.000,00
TOTALE COSTI DI GESTIONE	1.012.448,00

Il costo di gestione totale dell'impianto risulta pari a € 1.012.448,00 al netto del costo di energia elettrica poiché l'impianto nasce per produrre E.E. dalla FORSU. In caso contrario, includendo i costi energetici avremo $1.012.448,00 + 141.847,20 = 1.154.295,20$ €/anno. Dall'analisi svolta risulta quindi che il sistema proposto ha un costo gestionale pari a 1.154.295,20 €/anno.

5.4.2 Computo metrico estimativo impianto di digestione anaerobica a secco

DESIGNAZIONE DEI LAVORI	QUANTITA' (unità)	IMPORTO UNITARIO (euro)	IMPORTO TOTALE (euro)
<i>Movimenti di materia - Opere in verde</i>			
Caricamento e trasporto di materiali terrosi	1,00	25000,00	25000,00
Inerbimento e rinverdimento dell'argine con essenze schermanti	1,00	15000,00	15000,00
<i>Opere edili</i>			
Demolizione di strutture in c.a., trasporto in discarica e smaltimento	65,70	20,09	1319,91
Scavi di fondazione in materiali sciolti e trasporto in discarica	320,30	4,01	1284,40
Scavi di fondazione in roccia e trasporto in discarica	95,20	18,56	1766,91
Rinterri e rilevati	50,40	10,00	504,00
Calcestruzzo magro per fondazione	49,20	86,00	4231,20
Calcestruzzo armato per fondazioni e platee impianto	301,20	96,00	28915,20
Calcestruzzo armato per murature in elevazione	182,12	100,40	18284,85
Fornitura, lavorazione e posa in opera di barre di acciaio	34998,40	1,82	63697,09
Casseforme per getti in cls per platea di fondazione	615,30	20,00	12306,00
Casseforme per getti in cls per opere in elevazione	1029,20	21,00	21613,20
Pavimentazione monolitica costituita da massetto in c.a.	2490,85	35,00	87179,75
Muratura di blocchi cavi in cls	762,80	25,00	19070,00
Lastra trasparente in PMMA a tenuta stagna	91,20	38,40	3502,08
Strutture metalliche di finitura	1347,00	135,00	181845,00
Strutture metalliche per trattamenti primari	43,60	100,00	4360,00
Griglie in acciaio per canaline di raccolta del percolato	69,10	50,00	3455,00
Copertura carrabile di vasche interrate	42,00	100,00	4200,00
Fornitura e posa in opera di canalina forata di insufflazione nella platea di trattamento	800,00	85,00	68000,00
Fornitura e posa in opera di "biomoduli" per pavimentazione areata di biofiltro	120,00	45,60	5472,00
Fornitura e posa in opera collettore di insufflazione per maturazione fango digerito	10,00	5000,00	50000,00
Fornitura e montaggio valvola a sfera per evacuazione percolato dalle canaline di insufflazione	33,00	250,00	8250,00
Ripristino palazzina uffici	1,00	40000,00	40000,00
Realizzazione impianto idraulico-igienico-sanitario della palazzina uffici	1,00	20000,00	20000,00
<i>Macchine e impianti di pretrattamento, digestione anaerobica, utilizzo biogas e generazione energia elettrica</i>			
Macchina rompisacchi per lacerazione dei sacchetti di FORSU	1,00	310000,00	310000,00
Fornitura e posa in opera di nastro trasportatore in gomma	0,00	40000,00	0,00
Fornitura macchina vagliatrice a tamburo rotante per vagliatura della FORSU	1,00	120000,00	120000,00
Separatore idraulico	0,00	120000,00	0,00
Spremitrice	0,00	260000,00	0,00
Vasche di precarica della miscela di fango da avviare a fermentazione anaerobica	0,00	95000,00	0,00

Digestore anaerobico dotato di gasometro a tetto flottante	0,00	740000,00	0,00
Digestore anaerobico Bekon	6,00	150000,00	900000,00
Gasometro esterno di stoccaggio del biogas	1,00	200000,00	200000,00
Dispositivi di spillamento, recupero e trattamento del biogas	1,00	130000,00	130000,00
Impianto di cogenerazione per l'impiego di biogas prodotto da digestione anaerobica	1,00	1330000,00	1330000,00
Fornitura e posa in opera dei sistemi accessori necessari per pretrattamenti e digestione anaerobica	1,00	740000,00	740000,00
Impianto di compostaggio			
Fornitura e posa in opera di quadro di comando	1,00	30000,00	30000,00
Fornitura e installazione di quadri di distribuzione alimentazione per utenze elettriche e quadro di comando	2,00	10000,00	20000,00
Sonda per il controllo della temperatura e dell'umidità nel cumulo di rifiuti	16,00	2500,00	40000,00
Fornitura in opera di centralina di trasmissione segnali	8,00	1500,00	12000,00
Fornitura in opera del sistema di irrorazione fango da digestione anaerobica cumuli materiale strutturante	1,00	50000,00	50000,00
Fornitura in opera di ventilatore tipo AR 50/2 AISI 304	10,00	8000,00	80000,00
Fornitura di portoni con dispositivo motorizzato per chiusura e apertura	8,00	4000,00	32000,00
Fornitura e posa in opera di impianto elettro-idraulico per alimentazione del sistema di compostaggio	1,00	45000,00	45000,00
Fornitura e posa in opera di macchina vagliatrice a tamburo rotante per vagliatura di compost e rifiuti secchi	1,00	125000,00	125000,00
Macchine semoventi ed attrezzature			
Fornitura di pala gommata per la movimentazione dei rifiuti	2,00	150000,00	300000,00
Fornitura di autocarro dotato di braccio idraulico per la movimentazione di cassoni scarrabili	1,00	120000,00	120000,00
Fornitura di autocarro per il conferimento della FORSU e del materiale strutturante	2,00	100000,00	200000,00
Fornitura di compressore di potenza superiore a 100kW	0,00	20000,00	0,00
Fornitura di pompa dotata di motore elettrico di potenza superiore a 10kW	0,00	10000,00	0,00
Fornitura di cassoni scarrabili in lamiera pressopiegata della capacità di 25mc	1,00	3500,00	3500,00
Fornitura di cassoni scarrabili in lamiera pressopiegata della capacità di 30mc	3,00	4000,00	12000,00
Impianti tecnologici generali			
Fornitura e posa in opera di gruppo di pressurizzazione antincendio	1,00	25000,00	25000,00
Opere elettriche per alimentazione del gruppo di pressurizzazione antincendio	1,00	5000,00	5000,00
Fornitura, scavo e posa in opera di letto di posa in stabilizzato di cava e riempimento cavi di tubazione	550,00	100,00	55000,00
Fornitura e posa in opera di gruppo antincendio (idrante, cassetta, lancia, tubo)	8,00	400,00	3200,00
Fornitura e posa in opera di gruppo antincendio per attacco autopompa (2 coppie di flange e cassetta)	1,00	500,00	500,00
Fornitura e posa in opera di cabina di trasformazione MT/BT	1,00	65000,00	65000,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x70mmq e collegamenti elettrici	600,00	24,04	14424,00

Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x16mmq e collegamenti elettrici	600,00	8,53	5118,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x95mmq e collegamenti elettrici	400,00	31,80	12720,00
Fornitura e posa in opera in cavidotto di cavo tetrapolare in rame sezione 4x120mmq e collegamenti elettrici	360,00	39,00	14040,00
Fornitura e posa in opera di quadro elettrico di distribuzione	5,00	2500,00	12500,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 350A	3,00	3000,00	9000,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 150A	3,00	1200,00	3600,00
Fornitura e posa in opera di interruttore automatico magnetotermico con corrente nominale pari a 200A	3,00	2000,00	6000,00
Fornitura di gruppo elettrogeno a motore endotermico a ciclo diesel	1,00	70000,00	70000,00
Fornitura e posa in opera di gruppo automatico di rifasamento a controllo elettronico	1,00	12000,00	12000,00
Fornitura e posa in opera di rete di terra	2000,00	12,00	24000,00
Realizzazione impianto illuminazione esterno e interno palazzina uffici, capannone pretrattamento e maturazione	1,00	50000,00	50000,00
Fornitura di ventilatore e impianto di aspirazione dei capannoni di ricezione rifiuti e trattamento primario	2,00	40000,00	80000,00
Fornitura di tubazioni di collegamento tra capannoni di ricezione e di pretrattamento	1,00	25000,00	25000,00
Fornitura di ventilatore a servizio del capannone di maturazione accelerata del fango digerito	2,00	60000,00	120000,00
Realizzazione di tubazioni di collegamento tra il capannone di maturazione accelerata ed i ventilatori	1,00	15000,00	15000,00
Lavori vari a corpo			
Adeguamento impianto di raccolta e stoccaggio delle acque meteoriche dei tetti e chiusini	1,00	25000,00	25000,00
Realizzazione impianto di gestione delle acque meteoriche, comprese canalizzazioni e disotturazione delle condotte	1,00	70000,00	70000,00
Adeguamento e integrazione delle pavimentazioni esistenti in cls o conglomerato bituminoso	1,00	50000,00	50000,00
Realizzazione impianti termici e di condizionamento nella palazzina uffici	1,00	20000,00	20000,00
TOTALE (euro)			6280858,59

5.4.3 Business plan impianto di digestione anaerobica a secco

DESIGNAZIONE DEI LAVORI	IMPORTO (euro)
Movimenti di materia - Opere in verde	40.000,00
Opere edili	861.208,00
Macchine e impianti di pretrattamento, digestione anaerobica, utilizzo biogas e cogenerazione	3.730.000,00
Impianto di compostaggio	434.000,00
Macchine semoventi ed attrezzature	635.500,00
Impianti tecnologici generali	627.102,00
Lavori vari a corpo	172.190,00
TOTALE	6.500.000,00

CALCOLO RATA DI AMMORTAMENTO	
Somma	6.500.000,00
Tasso annuo	4,00%
Anni	15
Rate/anno	1
Tasso periodale	4,00%
Rate totali	15
$q = (1+i)$	1,04
$q^n = (1+i)^n$	1,800943506
Rata	584.617,15
Importo mensile	48.718,10
Tasso annuo eff.	4,0000%

PIANO DI AMMORTAMENTO				
	Rata	Quota interessi	Quota capitale	Debito residuo
	=	=	=	6.500.000,00
1	584.617,15	260.000,00	324.617,15	6.175.382,85
2	584.617,15	247.015,31	337.601,84	5.837.781,01
3	584.617,15	233.511,24	351.105,91	5.486.675,10
4	584.617,15	219.467,00	365.150,15	5.121.524,95
5	584.617,15	204.861,00	379.756,15	4.741.768,80
6	584.617,15	189.670,75	394.946,40	4.346.822,40
7	584.617,15	173.872,90	410.744,25	3.936.078,15
8	584.617,15	157.443,13	427.174,02	3.508.904,13
9	584.617,15	140.356,17	444.260,98	3.064.643,15
10	584.617,15	122.585,73	462.031,42	2.602.611,73
11	584.617,15	104.104,47	480.512,68	2.122.099,05
12	584.617,15	84.883,96	499.733,19	1.622.365,86
13	584.617,15	64.894,63	519.722,52	1.102.643,34
14	584.617,15	44.105,73	540.511,42	562.131,92
15	584.617,15	22.485,28	562.131,87	0,05

COSTI ANNUI (gestionali ed energetici)	IMPORTO (euro)
Costi di gestione	1.012.448,00
Costi energetici	141.847,00

COSTI TOTALI
1.738.912,15

RICAVI ANNUI	PRODUZIONE ANNUA	unità	TARIFFA (euro/unità)	IMPORTO (euro)
Vendita energia elettrica	7.992,00	MWh	178,00	1.422.576,00
Conferimento della FORSU	29.000,00	t/anno	100,00	2.900.000,00
Conferimento dello strutturante	10.860,00	t/anno	10,00	108.600,00

RICAVI TOTALI
4.431.176,00

6. Conclusioni

La gestione dei rifiuti riveste un ruolo ad oggi sempre più importante per la definizione di una strategia ambientale sostenibile, nell'ottica sia della necessaria prevenzione e riduzione dell'impatto ambientale connesso all'intero ciclo di gestione, che di un miglioramento di ogni aspetto riguardante l'interazione tra uomo e ambiente e l'uso sostenibile delle risorse.

La gestione dei rifiuti va affrontato consapevolmente come un problema globale che ogni singolo Paese è chiamato ad affrontare, a partire da un'organica gestione a livello territoriale locale, tenendo conto delle singole specificità economiche, sociali ed ambientali.

Nel corso degli ultimi dieci anni la digestione anaerobica si è diffusa capillarmente in molti paesi europei, tra cui anche l'Italia. Questi impianti vengono realizzati non solo allo scopo di recuperare energia rinnovabile, il biogas, ma anche di controllare le emissioni maleodoranti derivate dai rifiuti putrescibili e di stabilizzare le biomasse prima del loro utilizzo agronomico.

In Italia la normativa sugli incentivi alla autoproduzione di energia elettrica da fonti rinnovabili ha condotto in questi ultimi anni verso un rinnovato interesse legato agli impianti di digestione anaerobica per l'estrazione del biogas.

Anche il processo di evoluzione nella politica ambientale, che riguarda il settore della valorizzazione energetica delle biomasse, attivatosi a seguito della Conferenza di Kyoto sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico da gas serra (di cui il metano è uno dei principali), ha accentuato l'attenzione sul recupero energetico del biogas.

Ne deriva l'utilità di potenziare e di razionalizzare i sistemi che sfruttano processi di codigestione anaerobica di biomasse di varia natura (fanghi di depurazione, biomasse di origine zootecnica e agroindustriale e frazioni organiche derivanti da raccolte differenziate secco/umido dei rifiuti urbani), come, ad esempio, incomincia ad accadere negli impianti centralizzati operativi nel nostro Paese, seppure in maniera più lenta rispetto ai nostri vicini Europei.

L'applicazione della digestione anaerobica al trattamento dei rifiuti consente sia di conseguire un notevole recupero energetico, attraverso l'utilizzo del biogas prodotto, sia di produrre, attraverso il trattamento aerobico del fango digerito, un residuo stabilizzato impiegabile come ammendante organico in agricoltura o per ripristini ambientali.

A fronte delle considerazioni riportate in precedenza a favore dell'integrazione dei sistemi anaerobico-aerobico e nonostante la crescente diffusione della DA, i dubbi per la massiccia diffusione di questi sistemi derivano da una serie di criticità che possiamo così identificare:

- scarsa conoscenza della tecnologia di digestione anaerobica da parte di tutti gli attori coinvolti (operatori, enti pubblici autorizzanti, cittadini);
- costi di investimento superiori rispetto alla sola fase aerobica;
- maggiore complessità per i sistemi di trattamento dei reflui che esitano dal digestore.

Dal punto di vista regolamentare, si rileva inoltre la mancanza di una specifica normazione relativa alla digestione anaerobica, che, oltre a preoccupare e frenare gli investimenti di chi già opera in tale campo, rende difficili le necessarie scommesse nella ricerca e nello sviluppo di nuove e più efficienti tecnologie; in attesa che anche la normativa sia al passo con l'evoluzione del settore, è utile da parte degli esperti del settore approfittare di questo momento di incertezza per studiare approfonditamente quelli che possono essere gli sbocchi e gli sviluppi più interessanti in un futuro ormai sempre più prossimo.

Oltretutto, dopo aver studiato con attenzione il complesso degli investimenti, della producibilità, delle spese e dei lavori da sostenere per la realizzazione di un impianto di digestione anaerobica a secco, piuttosto che un analogo con tecnologia ad umido, si ritiene molto interessante evidenziare in questa sede le seguenti peculiarità (tralasciando naturalmente i benefici economici riguardanti gli aspetti tecnologici già singolarmente analizzati nel corpo del presente lavoro di tesi):

- A fronte dei costi di realizzazione lievemente maggiori, legati agli investimenti in tecnologie ancora non diffuse capillarmente sul territorio e in parte compensati dalle semplificazioni relative ai processi di pretrattamento e diluizione, si verificano costi di gestione ridotti che nel tempo ripagano ampiamente le spese iniziali.
- Si determina un impatto ambientale negativo molto ridotto, specialmente grazie all'eliminazione della necessità di aggiungere acqua di diluizione alla miscela e dunque di procedere a costosi e impegnativi processi di trattamento e smaltimento della stessa a termine del ciclo produttivo.
- Migliore qualità del compost ottenuto a fine processo, ottimo per il suo completo riutilizzo in agricoltura, con maggiori quantità di sostanza organica e nutrienti.

Inoltre i numerosi benefici tecnologici e semplificazioni di processo consentono di conseguire un risparmio notevole di manodopera e investimenti strutturali: i semplificati pretrattamenti e l'assenza di complicati sistemi di miscelazione, disidratazione e depurazione della miscela sono solo le più evidenti miglioni tra le numerose sottolineate in precedenza nella stesura di questo lavoro.

A conclusione dell'analisi dello stato dell'arte delle tecnologie di trattamento biologico, anaerobico (ad umido o a secco) ed aerobico, delle biomasse e degli scarti organici e alla luce dell'evidenza dell'effettiva possibilità di trasformare quest'ultimi in energia e in fertilizzanti, contribuendo a ridurre il carico inquinante sull'ambiente, si evince l'utilità anche in Italia di:

1. agevolare la diffusione e l'accrescimento delle conoscenze scientifiche riguardanti la digestione anaerobica a secco, anche attraverso la realizzazione di impianti pilota e investimenti per lo sviluppo di tecnologie Italiane in tal senso;
2. favorire l'integrazione dei processi anaerobici ed aerobici nel trattamento delle biomasse e dei rifiuti organici sia nella costruzione di nuovi impianti che nel potenziamento di impianti già esistenti, quali, ad esempio, gli oltre 100 impianti di compostaggio di media e grossa taglia già operanti nelle vicinanze dei siti di produzione di scarti organici agroindustriali e di effluenti zootecnici;
3. favorire l'utilizzo del biogas, dopo purificazione a metano al 95% (l'anidride carbonica recuperata è a sua volta un gas tecnico richiesto dal mercato), per autotrazione e immissione nella rete di distribuzione del metano; ciò dovrebbe essere incentivato in particolare nelle regioni dove la rete dei metanodotti è capillarmente diffusa ed è già esteso l'uso del metano per autotrazione;
4. attivare, vista la necessità di gestire crescenti quantità di frazioni organiche derivanti dalla raccolta differenziata dei rifiuti urbani, progetti di codigestione anaerobica di queste biomasse assieme ai liquami zootecnici e agli scarti agroindustriali;
5. favorire la realizzazione di impianti di biogas negli allevamenti zootecnici: particolarmente interessante è l'utilizzo del biogas per cogenerare energia elettrica ed energia termica, interessante è anche la possibilità di digerire, assieme ai liquami zootecnici, le colture energetiche (es. mais e sorgo zuccherino) e i residui colturali, aumentando la resa energetica degli impianti;
6. potenziare i digestori anaerobici dei fanghi derivanti dalla depurazione di acque reflue civili (presenti nei grandi impianti di depurazione urbani), favorendo la codigestione di liquami zootecnici e scarti organici agroindustriali; è auspicabile la realizzazione in coda alla digestione anaerobica di impianti di compostaggio per una migliore stabilizzazione dei fanghi.

BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. (2008) “Valorizzazione dei rifiuti organici per la produzione di idrogeno e metano” Nuova GEA – Quaderni per l’ambiente – Anno 5 – n. 4 Dicembre 2008
- ANPA – ONR (2001) “Rapporto Rifiuti 2001”; Capitolo 1 – La produzione e la gestione dei rifiuti urbani Par. 5.1.3.1 Il recupero di materia: il compostaggio dei rifiuti urbani
- ANPA GDL Unità Normativa Tecnica (2002) “Il trattamento anaerobico dei rifiuti: aspetti progettuali e gestionali”, Manuali e linee guida 13/2002 ANPA – Agenzia nazionale per la Protezione dell’ambiente; http://aida.casaccia.enea.it/aida/file/APAT_2002.pdf; data ultima consultazione 11/01/2013
- Antonio Gravina (1997) “Costi di realizzazione e di esercizio: esempi e costi unitari” Tratto dal Primo Corso nazionale di perfezionamento “Progettazione e gestione di impianti di compostaggio” a cura del Consorzio Italiano Compostatori
- APAT (2002) “Il trattamento anaerobico dei rifiuti”; APAT – Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici
- APAT (2003) Analisi dei fattori di emissione di CO₂ dal settore dei trasporti”; APAT – Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici
- APAT (2005) “Rapporto Bio-energia e cambiamenti climatici”, Roma; APAT – Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici
- APAT GDL (2005) “Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi: aspetti fondamentali, progettuali, gestionali, di impatto ambientale ed integrazione con la depurazione delle acque reflue”, Manuali e linee guida 13/2005 APAT – Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici; http://www.dailyenmoveme.com/sites/dailyenmoveme.com/files/Manuali_Linee_Guida_2005.pdf, data ultima consultazione 11/01/2013
- ASTER, CESEN, CESVIT et al. (2001) “Utilizzo energetico della biomassa”; Programma Energie, Progetto OPET
- BEKON (2013) – Documentazione tecnica online, www.bekon.eu, data ultima consultazione 10/01/2013
- Bemporad E., Coronidi M., Sagnotti G. (2006) “La riduzione dei gas serra nel settore della gestione dei rifiuti: un contributo agli obiettivi del protocollo di Kyoto”, ENEA
- Blengini G.A., Fantoni M. (2009) “Analisi LCA di alcuni scenari di trattamento della FORSU, in “Compost ed energia da biorifiuti” (a cura di R. Vismara, M. Grosso, M. Centemero), Dario Flaccovio Editore

- Bonomo L., Consonni S. et al. (2006) “Analisi di fattibilità preliminare della digestione anaerobica di fanghi e frazione organica dei rifiuti” Relazione finale - POLITECNICO DI MILANO; D.I.I.A.R. - Sezione Ambientale, Dipartimento di energetica
- Boschi C. (2010) Risultati del progetto sperimentale SOFILVU - “Impiego di compost di qualità in agricoltura: studio degli effetti sui terreni agricoli e nelle aree urbane e dello scenario tecnico-economico sulle prospettive organizzative e gestionali della filiera”, Ecomondo 2010, Confservizi Cispel Toscana; http://www.compost.it/biblio/2010_ecomondo/4Boschi_Ecomondo.pdf; data ultima consultazione 13/01/2013
- Bozano Gandolfi P. (2010) “Esperienze pratiche nella produzione di biogas e di energia da rifiuti”, RS Rifiuti Solidi Vol. XXIV n. 2 marzo-aprile 2010
- Calcaterra E., Confalonieri A. (2001) “Le tecnologie per l’abbattimento degli odori prodotti da impianti di compostaggio” Tratto da “Il compostaggio in Italia” Maggioli
- Camillucci Sergio (2009) “Scenari globali energetici e di emissioni, gli attori coinvolti, ruolo ed opportunità per gli energy managers”, ENEA – Ente per le Nuove tecnologie, l’Energia e l’Ambiente; <http://www.tecnosophia.org/documenti/Articoli/SessioneI/Camillucci.pdf>; data ultima consultazione 12/01/2013
- Carbone N., Fortunato B. (2009) “Dimensionamento di massima di un digestore anaerobico per produzione di biogas” Politecnico di Bari, Tema d’anno in Energie Alternative; http://climeg.poliba.it/file.php/100/Materiale_didattico/Biomasse/Digestore.pdf; data ultima modifica 12/01/2013
- Canovai, Valentini (2001) “Elementi di progettazione e gestione di impianti di compostaggio a tecnologia complessa”, tratto da “Il compostaggio in Italia” Maggioli – 2001
- Centemero M. (2002) “Il ruolo dei compost nei piani di fertilizzazione”, L’informatore Agrario n. 40/2002
- Centemero M. (2006) “Il compostaggio nella gestione dei rifiuti urbani”, in: Il Compost di Qualità Annuario 2006/2007 – V Edizione
- Centemero M., Zanardi W. (2007) “Il trattamento biologico dei rifiuti urbani in Italia: compostaggio, trattamento meccanico-biologico, digestione anaerobica”, CIC - Consorzio Italiano Compostatori
- Centemero M., Caimi V. (2001) “Impieghi del compost: settori di maggior rilevanza, modalità d’uso, scenari attuali di mercato” Tratto da “Il compostaggio in Italia” Maggioli

- Centemero M., Caimi V., Adani F. (2002) "L'impiego del compost in agricoltura"
- Centemero M., Newmann D., Favonio E. (2010) "Rapporto CIC 2010 sullo stato dell'arte in Italia e all'estero"
- Centemero M et Al. (2006) "Compost e agricoltura tra presente e futuro - Meno rifiuti in città, più qualità in campagna" (a cura di M. Centemero e il Gruppo di Studio sul Compostaggio e la Gestione Integrata dei Rifiuti, Scuola Agraria del Parco di Monza), febbraio 2006
- Ceron A., Franz L., Rigoli F. (2009) "Monitoraggio dei parametri microbiologici nei processi di compostaggio e digestione anaerobica", V Forum interregionale sul compostaggio
- CIC (2007) "Guida all'impiego di compost di qualità"; Coldiretti, CIC- Consorzio Italiano Compostatori, marzo 2007
- CITEC GDL (2004) "Linee guida per la progettazione, realizzazione e gestione degli impianti a tecnologia complessa per lo smaltimento dei rifiuti urbani", a cura del Gruppo di lavoro; Sep Pollution, Padova Fiere, Marzo 2004
- CIC GDL (2006) "L'integrazione tra la digestione anaerobica e il compostaggio" Gruppo di Lavoro Comitato Tecnico Consorzio Italiano Compostatori sulla Digestione Anaerobica, Novembre 2006
- Commissione Europea (2008) "LIBRO VERDE - la gestione dei rifiuti organici biodegradabili nell'Unione Europea", Bruxelles, 3 dicembre 2008
- Confalonieri A. (2010) "La digestione anaerobica dei rifiuti urbani" Scuola Agraria del Parco di Monza; <http://www.informambiente.it/wp-content/uploads/2010/03/CONFALONIERI-La-digestione-anaerobica-dei-rifiuti-urbani.pdf>, data ultima consultazione 11/01/2013
- CRPA (2006) "Stato dell'arte delle tecnologie di trattamento di tipo anaerobico e aerobico degli scarti organici", Reggio Emilia, Ottobre 2006 a cura di Piccinini S., CRPA – Centro Ricerche Produzioni Animali; <http://www.atgatuttogas.it/biogas-ricerche-e-studi/impianti-crpa-modelli.pdf>, data ultima consultazione 11/01/2013
- CRPA, S. Piccinini (2007) "Le tecnologie di produzione del biogas", Presentazione, Reggio Emilia
- CRPA, S. Piccinini (2007) Articolo "Il biogas da liquami zootecnici: la situazione in Italia", Reggio Emilia
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità"

- Favonio E. (1997) "Tecnologie e sistemi operativi per il Compostaggio. Criteri di individuazione della coerenza progettuale e gestionale" Tratto dal Primo Corso nazionale di perfezionamento "Progettazione e gestione di impianti di compostaggio" a cura del Consorzio Italiano Compostatori
- Favoino E. (2010) "Trattamenti biologici dei rifiuti biodegradabili: tecnologie, tendenze e prospettive" RS n. 1 gennaio-febbraio 2010
- Favonio E. (2001) "Gli odori negli impianti di compostaggio: la prevenzione e la gestione del problema" Tratto da "Il compostaggio in Italia" Maggioli
- Favonio E., Centemero M., Ricci M., Tornavacca A. (2000) "Le raccolte differenziate degli scarti compostabili in Europa ed il confronto con l'Italia: specificità, risultati, costi ed ottimizzazione dei sistemi"
- Federambiente (2005) "Bilancio ambientale, energetico ed economico del recupero di energia da rifiuti urbani mediante produzione di CDR e co-combustione in impianti non dedicati" Relazione finale Volume I
- Frigerio M. (2009) "Biometano per autotrazione: tecnologie, analisi energetica, analisi economica e calcolo degli incentivi",; Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Industriale, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Energetica
- Gerli A., Merzagora W. (2000) "L'evoluzione della situazione italiana nel campo della valorizzazione energetica della frazione organica di rifiuti solidi urbani", relazione presentata al Convegno produzione ed utilizzo di biogas, recupero di energia e razionalizzazione del ciclo di trattamento rifiuti, organizzato da Itabia nell'ambito della fiera Sep-Pollution 2000, Padova
- Ghezzi R. (2005) "La digestione anaerobica di biomasse come fonte di energia rinnovabile: valutazione di scenari attraverso la metodologia LCA" Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Milano, Anno Accademico 2004-2005
- Ghiringhelli, Giavini, Centemero (2011) "Dai rifiuti organici domestici al biometano in rete", RS volume XXV n. 4 luglio – agosto 2011
- Giacetti, Contri, Muraro (2009) "Digestione anaerobica e integrazione tra digestione anaerobica e compostaggio: l'esperienza della società ETRA S.p.A.", in "Compost ed energia da biorifiuti" (a cura di R. Vismara, M. Grosso, M. Centemero), Dario Flaccovio Editore
- Gonfalonieri A. (2010) "Novità e prospettive sulla digestione anaerobica dei rifiuti urbani in Europa e nel nostro Paese" – Atti della XII Conferenza Nazionale sul Compostaggio. Produzione di ammendante compostato e biogas da rifiuti. Rimini, 3-6 Novembre 2010

- GRTN (2004) "Statistiche sulle fonti rinnovabili in Italia" GRTN – Gestore del Sistema Elettrico Nazionale
- GSE (2007) "Il nuovo conto energia", Roma
- IEA (2010) "Le prospettive tecnologiche nell'energia: scenari e strategie da oggi al 2050"; http://www.iea.org/techno/etp/etp10/Italian_Executive_Summary.pdf; data ultima consultazione 12/01/2013
- Ingegneria e Servizi (2012) "Impianto di compostaggio con digestore anaerobico integrato ubicato in agro di Molfetta alla C.da Torre di Pettine: progetto di integrazione, adeguamento e rimessa in funzione dell'impianto", Bari
- ITABIA (2001) "Biomasse agricole e forestali, rifiuti e residui organici: fonti di energia rinnovabile. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo a livello nazionale", ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente
- Lombardi M., Rubini L., Vivoli F.P. (1998) "Energia dalle biomasse, le tecnologie e le applicazioni", ISES Italia
- Lorenzoni A., Bano L. (2007) "Presentazione I costi di generazione di energia da fonti rinnovabili", Roma
- Lorenzoni A., Zingale L. (2004) "Le fonti rinnovabili di energia. Un'opportunità di politica industriale per l'Italia" Franco Angeli, Milano
- Ludovico Spinosa (1994) "Gestione integrata dei rifiuti: ruolo del compostaggio" In "Ingegneria della trasformazione in compost" – C. I. P. A. Editore
- Malpeli F. (1997) "Digestione anaerobica", Manuale dell'Ingegnere, Hoepli Edizioni
- Malpei F., Rigamonti L., Grosso M. (2008) "Il bilancio energetico ed ambientale di alcuni scenari di digestione anaerobica della FORSU", in "Biogas da rifiuti solidi urbani" (a cura di R. Vismara, F. Malpei, M. Centemero), Dario Flaccovio Editore
- Merzagora W. (2008) "La produzione di biogas dalle frazioni umide dei rifiuti" - La Termotecnica - Ottobre 2008
- Piccini S. (2011) "Studio di fattibilità della filiera del biometano da effluenti zootecnici e/o da discarica per autotrazione/immissione in rete", Regione Piemonte, novembre 2011
- Piccinini S. (2004) "Digestione anaerobica: il recupero di biogas dai liquami zootecnici ed altre biomasse"; CRPA Reggio Emilia
- Piccinini S. (2004) "Biogas: produzione e prospettive in Italia"; Convegno Nazionale sulla Bioenergia, Roma, 12 Maggio 2004

- Piccinini S. (2004) "Sistemi integrati aerobici/anaerobici di trattamento dei rifiuti organici ed altre biomasse"; CRPA Reggio Emilia
- Rossi L., Piccinini S. (1999) "I possibili sistemi operativi: tecnologie, macchine e attrezzature utilizzabili"; 4° Corso Nazionale di base "Produzione ed impiego del compost di qualità" C.I.C., Valenzano (BA), a cura del Consorzio Italiano Compostatori, maggio 1999
- Rossi L., Piccinini S. (1999) "L'impianto di compostaggio per matrici selezionate: criteri progettuali e scelte tecnologiche" - 3° Corso Nazionale di Perfezionamento "Progettazione e gestione di impianti di compostaggio" C.I.C., Reggio Emilia, maggio 1999
- Rossi L., Piccinini S. (2001) "L'impianto di compostaggio: a cumuli areati e rivoltati" Tratto da "Il compostaggio in Italia" Maggioli
- Rossi L., Piccinini S. (2001) "Le tecnologie di compostaggio: soluzioni innovative" Tratto da "Il compostaggio in Italia" Maggioli
- Santi M., Cecchini M. (2009) "Analisi e piano energetico di una azienda agricola per la fattibilità di un impianto di digestione anaerobica" Università degli studi della Tuscia di Viterbo, Tesi di Dottorato di ricerca in Meccanica Agraria; [http://dspace.unitus.it/bitstream/2067/1279/1/Tesi%20Dottorato Massimo%20Santi.pdf](http://dspace.unitus.it/bitstream/2067/1279/1/Tesi%20Dottorato%20Massimo%20Santi.pdf); data ultima modifica 12/01/2013
- Scaglia B., Tambone F., Centemero M., Favonio E. (2004) "Il compostaggio dei rifiuti urbani, Quaderno di Ingegneria Ambientale n. 40: I processi aerobici per il trattamento dei rifiuti urbani, a cura di F. Adani
- Torretta V., Urbini G. (2010) "La digestione anaerobica: tecnologie per la valorizzazione energetica degli scarti e criteri operativi – I Parte"; RS n. 5 Settembre-Ottobre 2010
- Urbini G., Torretta V., Bini P., Valvassori M., Conti F. (2008) "Digestione anaerobica: situazione impiantistica italiana ed europea"; RS Rifiuti Solidi vol. XXII n. 6 Novembre-Dicembre 2008
- Valli L., Piccinini S. (2000) "Gli odori negli impianti di compostaggio: come si producono e come determinarli" – Atti del Corso Nazionale di Specializzazione "Il compostaggio: novità e prospettive" C.I.C., Fiera di Rimini, Rimini, novembre 2000
- Vallini G., Briglia M., Bianchin L. (1987) "Metanogenesi: aspetti microbiologici e biochimici della degradazione anaerobica di substrati organici complessi"
- Vismara R., Grosso M., Centemero M. et al. (2009) "Compost ed energia da biorifiuti" – "Tecnologie per la digestione anaerobica della frazione organica degli RSU: il punto di vista di AD-MED"; <http://www.darioflaccovio.it/pdfdescr/607-DF8616.pdf>; data ultima consultazione 12/01/2012

- Vismara R., Malpei F., Centemero M. (2008) "Biogas da rifiuti solidi urbani Tecnologia-Applicazioni-Utilizzo"
- Zagaroli M., Canovai A., Mazzoni G. (1999) "La progettazione dell'impianto di compostaggio a tecnologia complessa" - 3° Corso Nazionale di Perfezionamento "Progettazione e gestione di impianti di compostaggio " C.I.C., Reggio Emilia, maggio 1999
- Zorzi G., Cristoforetti A., Odorizzi G., Andreottola A. (2000) "Trattamenti biologici della frazione organica", in: Gestione integrata dei rifiuti solidi urbani, 50° seminario di aggiornamento in Ingegneria Sanitaria Ambientale 29 Maggio- 1 Giugno 2000

Ringraziamenti

Accade sempre che al termine di una lunga, complessa e appassionante avventura, ci si guardi indietro e si ripercorrano i piccoli e grandi passi che l'hanno costituita e le persone che l'hanno popolata.

Allo stesso modo anch'io desidero ricordare e ringraziare brevemente, in occasione di questo giorno tanto atteso, chi ha reso lo studio più leggero, i sacrifici più accettabili e le soddisfazioni più gratificanti:

la mia famiglia, per la fiducia, l'aiuto, l'esempio e il consiglio;
gli amici vicini e lontani, per l'affetto, i sorrisi e il conforto;
il relatore, per l'ascolto, la disponibilità e la competenza;
i professori, per avermi aiutato in questi anni a scoprire le mie grandi debolezze e le mie reali capacità;

ed infine chi, leggendo queste parole, e pensando a questi 5 anni trascorsi, sente di aver lasciato in me una traccia del suo passaggio ed un ricordo,

perché sono i ricordi, insieme ai sogni, che danno un senso ai giorni che sembrano avere poco valore ed un valore inestimabile ad ogni traguardo raggiunto.